

# 몬테카를로법을 이용한 실내조도 계산

(Interior Lighting Calculation using Monte-Carlo Method)

金 燾 \*

(Hoon Kim)

## 요 약

입자의 배광분포를 가진 광원을 실내면에 설치하였을 경우에 대하여 실내면의 조도분포를 계산하는 프로그램을 작성하였다. 광원에서 방출된 빛의 입자에 대하여 그 경로를 추적하고, 이를 무수히 많은 입자에 대하여 반복함으로써 실내면의 조도분포가 계산된다. 최초 광원에서 입자가 방출되는 방향, 입자가 실내면에 충돌할 때 반사되는지 흡수되는지의 여부, 반사된 경우 입자의 새로운 경로를 결정하는데 누적 확률곡선과 난수의 관계에 의한 몬테카를로법이 적용된다.

이러한 모델을 바탕으로 시뮬레이션 프로그램을 작성함과 동시에, 프로그램의 실행결과가 정확한지를 검증하기 위하여, 여러종류의 광원과 실내면의 재질을 바꾸어 가며 조도분포를 측정하였다. 그 결과 광원의 크기가 방의 크기에 비하여 충분히 작은 경우 조도계산이 정확함을 알 수 있었다.

## Abstract

A computer program to calculate the illumination distributions of a room interior was made. The room has a light source with arbitrary intensity distribution. The program follows the paths of the particles from the light sources, and the illumination distribution is calculated by repeating this following to many particles. Monte Carlo method is applied to the decision of the direction of the particle from light source, and the new direction of the reflected particles.

Making simulation program on this basis, illumination distributions were measured for various light sources and wall surfaces to certify the calculated results. As a result, it is known that the calculated distribution would be correct if the size of the light source is sufficiently smaller than the size of the room.

### 1. 서 론

실내조명은 단순히 밝은 조명환경을 제공하는 것 뿐 아니라, 적절한 밝기의 분포, 눈부심의 제

거 등을 고려하여 종합적으로 평가되어야 한다.<sup>1)</sup>

이러한 평가에 있어, 실내면에서 조도의 분포를 아는 것이 필수적으로 요구되나, 종래 사용하여

\*正會員: 江原大 工大 電氣工學科 副教授  
接受日字: 1992年 11月 17日

\* 이 논문은 1991년도 교육부 지원 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음.

오던 실내조도 계산법은, 표준적인 계수들을 이용하여 전체 실내조도의 평균치만을 계산하거나(光束法), 광원의 배광분포를 기하학적으로 단순화하여 실내면의 조도분포를 해석적으로 계산해내는 방법 등으로서 정확한 조도분포를 알아내기가 원리적으로 불가능하다. 따라서 기존의 방법들을 이용하여 조명환경의 양적개선을 추구하는데에는 부족함이 없으나, 질적개선을 위해서는 조도분포를 정확히 계산해낼 수 있는 새로운 방법이 필요하다. 본 논문에서는 이미 발표한 가상적 점광원에 대한 조도분포 계산법에 이어,<sup>8)</sup> 임의의 배광분포를 갖는 실제광원이 있는 실내에서의 조도분포를, 몬테카를로 시뮬레이션을 사용하여 정확히 계산하는 프로그램에 대하여 설명한다.

실내조도 계산에서의 몬테카를로법은, 광원에서 방출된 광속(光束)을 구성하는 각각의 입자가 벽면에서의 반사를 거치다가 궁극적으로 흡수될 때까지의 경로를 추적하는 데 사용된다.<sup>2)~4)</sup> 빛의 입자가 광원에서 방출되는 방향, 그리고 벽면에 부딪혔을 때 반사, 흡수의 여부, 반사되었을 때 취하는 경로 등은, 그 물리적 과정을 표현하는 확률의 분포와 컴퓨터가 발생하는 난수(random number)에 의하여 결정된다. 이 시뮬레이션을 다수의 입자에 대하여 반복하면서 실내 각 부위에 입사된 입자의 수를 계산하면, 이 값이 그 위치의 조도와 비례하므로 실내조도의 분포를 계산할 수 있다.

본 연구에서는 확산반사, 또는 정반사면으로 구성된 직육면체의 방에서 광원의 위치, 배광분포, 방의 크기 및 각 부분의 반사율이 주어졌을 때, 시뮬레이션에 의하여 실내면의 조도분포를 계산하는 프로그램을 개발하고, 계산결과와 실제 측정된 결과를 비교하여 기법의 유효성을 입증하였다.

## 2. 관련이론

### 2.1 시뮬레이션의 원리

최초 광원에서 임의의 방향으로 방출된 빛의 입자는 직진하다가 경로중에 있는 실내면의 어느

점에 충돌하게 된다. 충돌한 빛은 실내면의 반사 특성에 따라 반사, 또는 흡수되며, 반사할 경우 또다시 어떠한 경로를 따라 직진하여 다른 점에 충돌하는 과정을 반복하게 된다. 이와같은 경로의 추적을 입자가 흡수될 때까지 반복하고, 이를 모든 입자에 대하여 반복 수행하면 실내면의 조도분포를 알 수 있게 된다.

이 과정에서 최초 광원에서 방출된 빛의 방향, 반사 흡수의 여부, 반사된 빛의 경로를 결정하는데 몬테카를로법이 이용된다. 즉, 광원에서 방출된 빛의 방사방향은 광원의 배광분포에 의하여 확률적으로 결정되며, 반사흡수 여부는 실내면의 반사율에 의해서, 반사광의 경로는 실내면의 반사특성에 의하여 확률적으로 결정된다.

이와같이 확률적으로 분포하고 있는 물리적 현상의 시뮬레이션에 몬테카를로 법이 이용될 수 있다. 어떤사건 x의 전체 범위에서 x값에 대한 누적확률곡선이 주어지면, 0과 1사이에서 균일한 분포로 발생하는 난수 R에 대하여 누적확률곡선의 역함수를 취함으로써 그 난수에 대한 x값을 알 수 있으며, 이를 무수히 반복함으로써 총체적 사건의 적절한 분포를 얻게 된다.<sup>5)</sup>

## 2.2 반사특성과 반사특성

### 2.2.1 점광원

전체 입체각에 걸쳐서 균일한 배광 분포를 가지는 점 광원의 경우 입자의  $\theta$ 방향 방사각도  $\alpha$ 는

$$\alpha = \cos^{-1}(1-2R) \quad (1)$$

R : 난수

로 된다. 만약 광원이 천장에 부착되어 있는 경우라면 빛은 광원의 아래쪽으로부터 방사되므로

$$\alpha = \cos^{-1}(1-R) \quad (2)$$

이다. 또한  $\phi$ 방향에 대해서는

$$\beta = 2\pi R_2 \quad (3)$$

로 구할 수 있다. 여기에서 각도  $\theta$ ,  $\phi$ 의 정의는 참고문헌 8에서와 같다.

### 2.2.2 실제의 광원

실제의 광원은 사용되는 광원과 등기구의 특성에 따라  $\theta$ ,  $\phi$ 방향으로 복잡한 변화를 하는 배광 분포를 갖게 된다. 이러한 경우  $\theta$ ,  $\phi$ 의 각각에 대한 누적확률곡선의 역함수를 해석적으로, 또는

수치해법을 이용하여 구하기는 매우 어려우며 정확도도 낮다. 따라서 실제의 광원에 대해서는, 빛의 방사방향을 균일분포의 점광원에서와 같이 계산하고, 방출되는 각 입자에 그 방향의 배광분포에 따른 가중치를 줌으로써 실제광원의 방사특성을 나타낼 수 있다. 이때 각 입자가 부딪히는 점에서는 충돌시마다 입자의 가중치를 더한다.

2.2.3 반사특성

충돌된 면에서의 흡수 반사 여부는 면의 반사율에 의하여 결정되며, 난수를 발생시켜서 이 값이 반사율보다 적으면 반사, 크면 흡수되는 것으로 판정하면 된다. 완전확산반사를 하는 면의 경우 반사각은 참고문헌 8과 같이 계산되며, 정반사의 경우에는 충돌전 입자의 경로를 나타내는 벡터에서 면에 수직인 성분만을 반대방향으로 취하여 새로운 경로로 삼으면 된다.

2.3 기하학적 고려사항

공간내 두 점 사이의 관계, 면의 정의 방법, 면과 선의 교점에 대한 정의는 이미 발표한 논문의 내용과 같다.<sup>8)</sup> 그러나 좌표축의 회전에 관련하여 방향코사인을 계산하는 수식은 다음과 같이 수정되어야 한다.

$$\begin{bmatrix} C_x \\ C_y \\ C_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta \cos\phi & -\sin\phi \sin\theta \cos\phi \\ \cos\theta \sin\phi & \cos\phi \sin\theta \sin\phi \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_x' \\ C_y' \\ C_z' \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.4 최종조도 계산

모든 입자에 대한 경로 추적을 마치면 실내면의 조도분포를 계산하게 된다. 실내면 각 점의 조도는 광원의 광속을 F, 그 점에 충돌한 입자들의 가중치 합계를 w, 광원에서 방사된 전체입자의 가중치 합계를 W<sub>t</sub>, 그 점이 대표하고 있는 면적을 A라 하면

$$E = \frac{Fw}{AW_t} \quad (6)$$

로 계산된다.

3. 측 정

실제의 광원에 대한 조도계산을 위해서는 광원의 배광분포와 실내면의 반사율을 측정하여야 한

다. 또한 시뮬레이션에 의한 조도계산의 정확도를 입증하기 위해서는 실제 실내면의 조도를 측정하여야 한다. 이 장에서는 이들의 측정법에 대해서 설명한다.

3.1 광원의 배광분포 측정

광원을 중심으로 하여  $\theta, \phi$ 각을 변화시키며 그 방향의 광도를 측정하는 것이 배광측정장치이다. 실내용 소형광원의 배광분포를 측정하기 위하여 그림 1과 같은 형태의 배광곡선 측정장치를 제작하였다. 전체 비임의 길이는 2m로서 한쪽 끝에는 배광분포를 측정하려는 동기구를 부착하고 다른 끝에는 광전지를 부착한다. 비임의 중심을 축으로 하여 비임을 회전시킴으로써  $\theta$ 방향의 회전을 일으키며, 광원을 매단 원판을 회전시켜  $\phi$ 방

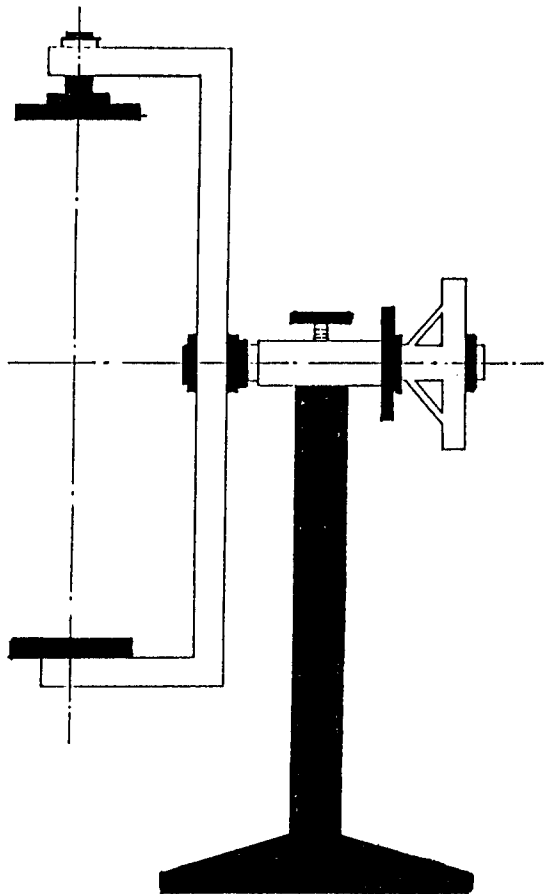


그림 1. 배광측정장치  
Fig. 1. Light distribution photometer

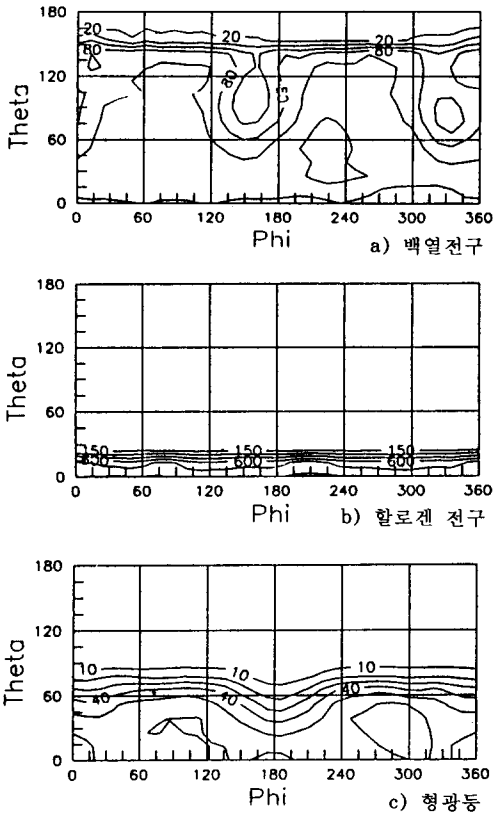


그림 2. 각 광원의 등광도도  
Fig. 2. Iso-candela diagrams of each light sources

향의 회전을 일으킨다.

광전지로는 조도계를 이용하고, 그 조도값을 읽어서 광원과 광전지 사이 거리의 제곱을 곱하면 그 방향의 광도  $I$ 를 알 수 있다.(역자승의 법칙) 실제 이 법칙은 점광원에 대하여만 성립하고, 광원크기의 10배이상 거리에서 측정하면 점광원으로 볼 수 있으므로,<sup>6)</sup> 본 연구에서는 20cm 이하의 크기를 가진 광원만을 사용하였다.

이와같은 배광측정장치를 제작하여, 실내 전체를 흑색으로 칠하여 반사를 없앤 암실에 이 장치를 설치한 후, 실험에 사용한 광원들의 배광분포를 측정하였다. 측정과정에서 전압의 변동에 의한 영향을 배제하기 위하여 광원들은 모두 자동전압조정기의 출력으로 점등하였다.

배광측정을 하여 각 방향으로의 광도분포를 구하면 광원의 총광속  $F$ 는

표 1. 광원들의 특성

Table 1. Specifications of the light sources

광원	등기구	배광분포 특성	광도 max/min	총광속	발광부 길이
백열전구	110V 100W	없음	전반확산	132/7	1148 2cm
할로겐전구	12V 50W	다이크로익 반사갓	직접형, 투광	1140/5	446 5cm
소형형광등	9W 전자안정기 110V	하면정사각 유백색카바	직접형	65/2	253 19cm

※ 광도의 단위는 cd, 광속의 단위는 lm

$$F = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi} I(\theta, \phi) \sin\theta \, d\theta \, d\phi \quad (7)$$

로 구해진다.

실험에 사용된 세개의 광원과 그 제원을 표 1에, 이들의 등광도도를 그림 2에 보였다.

### 3.2 반사율

반사율은 반사면에서의 입사광과 반사광 형태에 따라 여러 값을 가지나, 확산반사를 하는 면에서의 반사여부를 결정하는 데에는 방향성 입사-반구형반사(directional incident-hemispherical collected)에 대한 반사율을 이용한다. 이는 시뮬레이션 과정에서 빛을 입자로 보고 그 진행방향에 의해 충돌점이 결정되며, 확산반사한 빛은 반구 전체에 걸친 방향으로 퍼져 나가기 때문이다.

이 반사율은 미국조명위원회의 IES LM-44-1990 규정에 의하여 측정법이 규정되어 있으며, 본 연구에서는 이 방법을 이용하여 측정을 수행하였다.<sup>7)</sup>

본 연구에서 실내면으로 이용한 네가지 재질의 반사율은 표 2와 같다.

### 3.3 조도분포의 측정

실제의 방은 형상이 복잡하고 측정을 수행하는 사람의 이동 등이 영향을 미치므로 이를 방지하기 위하여 모델실을 제작하였다.

이 모델실은 길이 1.7m, 폭 1.0m, 높이 0.8m이며, 천정에는 등기구를 부착할 수 있도록 하였다. 바닥면의 조도는 10cm간격으로 파넬 홈으로 조도계의 광전지가 부착된 막대를 밀어서 측정하

표 2. 실내면의 반사율

Table 2. Reflectance values of the room surfaces

	반사율	반사특성	사 용 장 소
흰 색 종 이	0.81	확산반사	천정, 벽
회 색 종 이	0.22	확산반사	바닥
갈 색 종 이	0.45	확산반사	천정, 벽
검은종이 + 유리	0.3	정 반 사	벽일부(창문)

표 3. 계산과 측정시 주어진 조건

Table 3. Conditions for calculations and measurements

구분	광 원	벽	바 닥	광원위치	비 고
가	백 열 전 구	갈색종이	회색종이	천정중심	
나	백 열 전 구	흰색종이	회색종이	천정중심	
다	백 열 전 구	흰색종이	회색종이	천정중심	창문有
라	할로겐전구	흰색종이	회색종이	천정중심	
마	형 광 등	흰색종이	회색종이	천정중심	

며, 막대와 광전지 외부는 바닥면과 같은 재질로 마감하였다. 이같은 방법으로 바닥면에 대해서

표 4. 바닥조도의 값

Table 4. Values of the floor illuminations

구분	종 류	측 정 치	계 산 치 (광속 11m당 입자수에 따름)							오차(%)
			100	500	1000	5000	10000	20000	50000	
가	평 균 치	285	284	284	284	284	284	284	284	0
	최 대 치	408	635	492	470	437	423	420	418	2.5
	최 소 치	145	33	104	122	127	135	139	138	4.8
	균 제 도	2.81	19.3	4.73	3.87	3.46	3.13	3.02	3.02	7.3
나	평 균 치	503	502	502	503	503	503	503	503	0
	최 대 치	640	973	771	707	670	667	660	659	3.0
	최 소 치	320	139	251	285	299	312	311	308	3.8
	균 제 도	2.00	6.99	3.07	2.48	2.24	2.14	2.13	2.14	7.0
다	평 균 치	455	449	449	450	450	450	450	450	1.1
	최 대 치	574	883	688	652	607	597	595	586	1.4
	최 소 치	285	139	229	250	270	270	274	274	3.2
	균 제 도	2.01	6.34	3.01	2.61	2.25	2.21	2.17	2.14	6.5
라	평 균 치	281	272	272	272	272	272	272	272	3.2
	최 대 치	1957	3258	2431	2331	2206	2086	1988	2013	2.9
	최 소 치	61	4.72	31.0	34.3	45.4	45.5	49.7	52.2	14
	균 제 도	32.1	690	78.4	68.0	48.6	45.9	40.0	38.6	20
마	평 균 치	105	125	123	123	123	123	123	123	17
	최 대 치	142	381	245	214	191	177	174	175	23
	최 소 치	66	0	39.5	52.9	64.9	62.2	70.5	74.5	13
	균 제 도	2.15	-	6.19	4.04	2.94	2.84	2.47	2.35	9.3

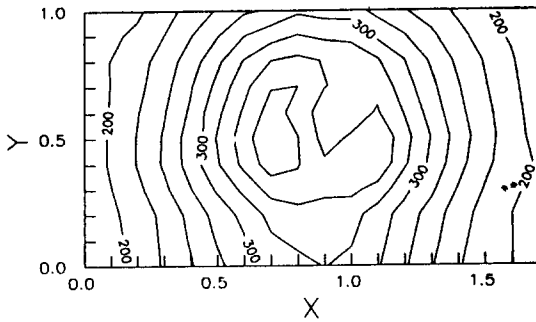
10cm×10cm간격으로 조도를 측정하였다.

#### 4. 프로그램작성 및 수행결과

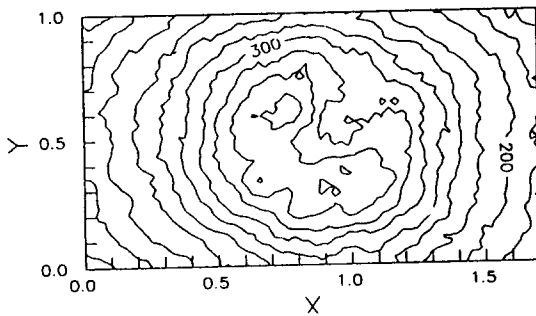
2장에서 서술한 이론을 바탕으로 하여 실내조도 계산 프로그램을 작성하였다. 프로그램을 수행시키면 먼저 두개의 파일에서 광원과 실내면에 대한 자료를 읽어들이고, 각 면의 특성값을 계산한 후 입자들의 경로추적을 시작한다. 경로추적을 마치면 조도계산을 하고 이를 파일에 저장한 후 끝낸다.

프로그램을 이용하여 계산한 결과와 측정결과를 비교하기 위하여 표 3에서와 같이 여러가지 주어진 상황에 대한 계산과 조도측정을 각각 수행하였다. 창문의 경우에는 뒷벽에 70cm×70cm의 흑색 종이와 유리를 겹쳐서 붙인 것으로 대신하였다.

표 4는 표 3의 각 상황에 대하여 바닥에서의



(a) 측정

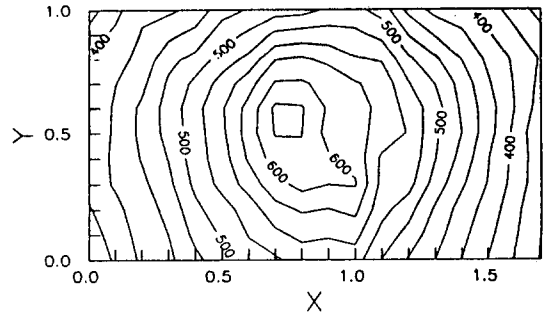


(b) 계산

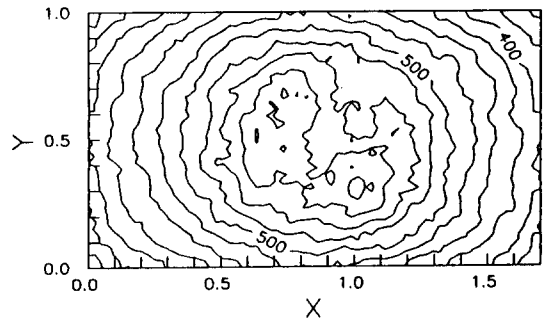
그림 3. 조건 “가”의 등조도곡선

Fig. 3. Iso-lux diagram for condition “가”

조도의 측정치와 계산치를 비교하여 나타낸 것이다. “가”와 “나”의 경우는 반사율 측정의 정확도가 낮으므로 측정된 반사율을 기준으로 반사율 값을 조절하여 정확한 조도가 계산되는 반사율을 찾아내는 데 이용하였고, “다”, “라”의 경우는 이 반사율을 대입하여 실제 계산을 수행하였다. 표에서 알 수 있듯이 백열전구와 할로겐 전구를 사용한 “가”-“라”의 조건에서는 측정과 계산에 있어서 바닥면 조도의 평균치, 최대치, 최소치, 균제도가 잘 일치하지만, 형광등을 설치한 “마”의 조건에서는 많은 오차가 있다. 이는 모델실의 높이가 80cm로서 형광등 기구에서 빛을 방사하는 커버부분의 최대 폭 19cm의 4배 밖에 되지 않으며, 따라서 광원을 점으로 치환하는 본 모델로서는 적절한 시뮬레이션을 행할 수 없는 것을 나타낸다. “라”의 경우에서 최소치와 균제도는 오차가 크지만, 이는 바닥면의 조도분포 범위가 매



(a) 측정



(b) 계산

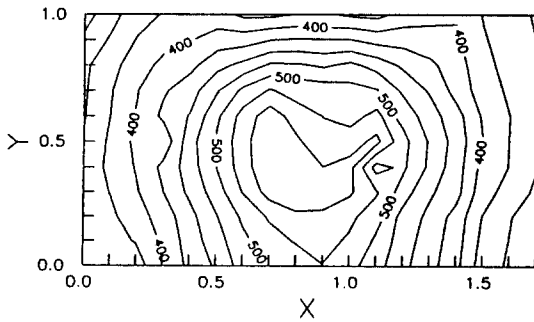
그림 4. 조건 “나”의 등조도곡선

Fig. 4. Iso-lux diagram for condition “나”

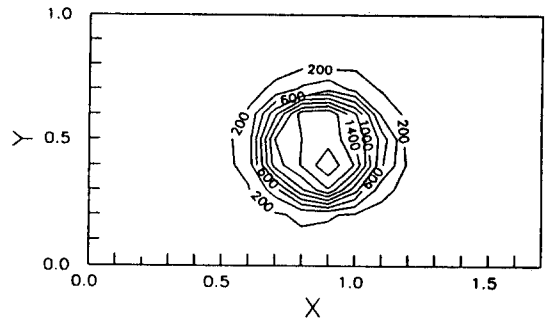
우 광범위한 것에 기인한다.

그림 3~7은 각 상황에 대하여 바닥면의 등조도 곡선을 그려 측정된 조도분포와 계산된 조도분포의 형태를 비교한 것이다. 역시 백열전구와 할로겐 전구를 사용한 경우에는 조도분포 형태가 서로 일치하지만 형광등의 경우에는 많은 차이가 있음을 알 수 있다.

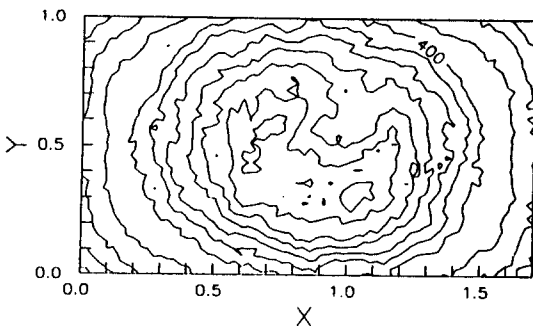
실제 이 프로그램을 이용하여 계산을 수행하여 보면, 입자의 갯수를 2만~3만개 정도로 하여 계산된 각 면의 조도 평균치는, 입자 갯수를 200만개 이상으로 설정하여 계산한 평균치와 거의 같다. 그러나 입자의 갯수가 적으면 실내면의 모든 점에 입자가 충돌할 기회가 없으며, 따라서 각 면의 조도의 최대, 최소값은 입자갯수를 증가시키면 따라 평균치 쪽으로 감소, 증가하는 것을 알 수 있다. 이 영향의 평가를 위하여, 각 경우에서 바닥면 조도의 최대치와 최소치, 균제도가 변



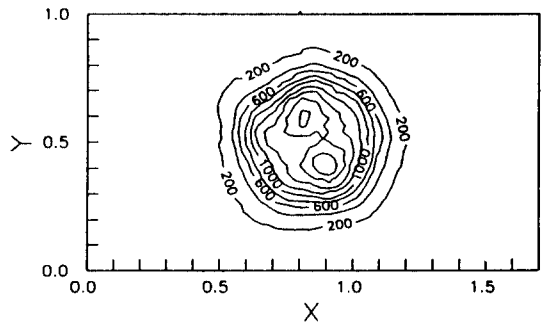
(a) 측정



(a) 측정



(b) 계산



(b) 계산

그림 5. 조건 “다”의 등조도곡선

Fig. 5. Iso-lux diagram for condition “다”

화하는 경향을 표 4에 나타내었다. 입자의 갯수를 계속 증가시키며 계산을 수행하고, 최대 최소치가 더 이상 변화하지 않는 갯수를 찾아본 결과, 광속 11m당 20,000개 정도의 입자가 적절한 갯수임을 알 수 있었다.

### 5. 결 론

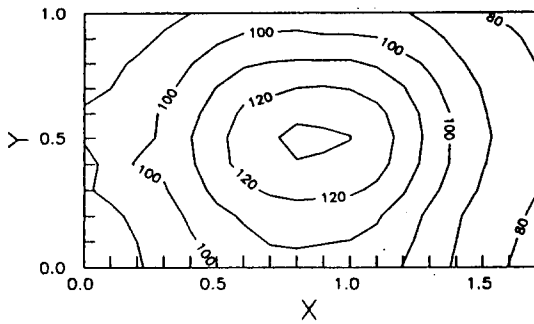
4장에서 설명한 바와 같이, 광원의 크기가 방의 크기에 비하여 충분히 작은 경우 조도분포 계산은 정확하며, 실제적으로 이용할 수 있다. 광원의 크기가 클 때에는 이 광원을 적절한 크기의 부분으로 나누어 배광곡선을 측정하고, 이들의 각각에 대하여 시뮬레이션을 수행하는 등의 노력이 필요하다. 적절한 방과 광원의 크기비 및 광원의 적절한 분리방법에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

그림 6. 조건 “라”의 등조도곡선

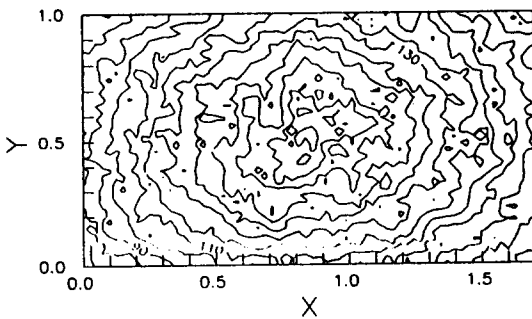
Fig. 6. Iso-lux diagram for condition “라”

이 프로그램을 실용적으로 사용하기 위해서는 단순한 6면체 이상의 복잡한 면을 가진 실내에 대하여 계산을 수행할 수 있도록 프로그램을 확장하여야 하며, 본 연구의 연장으로 현재 수행 중에 있다.

실제로 이 프로그램을 현장에서 이용하려면 조도분포가 적절한 입력데이터를 준 뒤 적어도 1시간 이내에 계산되어야 할 것이다. 계산시간은 실내면의 반사율에 따라 다소 차이가 있으나, 입자의 갯수에 직접 비례하며, 많이 이용되는 IBM-PC의 호환기종으로 386급(25MHz)를 사용할 때 수 시간 이상이 소요된다. 입자의 갯수는 계산된 조도의 평균치에는 영향을 미치지 않으며, 다만 최대최소치, 즉 균제도에만 영향을 미친다. 따라서 소수의 입자에 대하여만 조도분포를 계산한 뒤, 이에 적절한 계수를 곱하여 균제도를 조절하는 방법이 실용상 이용되어야 할 것이며, 실용화



(a) 측정



(b) 계산

그림 7. 조건 “마”의 등조도곡선

Fig. 7. Iso-lux diagram for condition ma

를 위해서는 가장 먼저 해결되어야 할 문제이다.

또한 일반 사용자가 면의 구성에 대한 깊은 지식이 없어도, 쉽게 면을 구성할 수 있고, 프로그램이 계산한 결과를 가시적으로 관찰할 수 있도록

록, 사용자 위주의 프로그램으로 개선할 필요가 있다. 특히 프로그램의 결과는, 단순한 수치가 아니라, 3차원적인 영상으로 가시화할 필요가 있으며, 이에 대해서는 상당한 노력과 비용이 투자되어야 할 것이다. 이러한 프로그램을 이용하여 조명설계를 실시할 때, 매번 실내면의 반사특성이나 광원의 배광분포를 측정할 수는 없으므로, 이들을 미리 측정하여 데이터베이스화할 필요가 있다.

### 참 고 문 헌

- 1) 지철근, 조명공학, 문운당, 1980
- 2) P. R. Tregenza, "The Monte Carlo method in lighting calculations", *Lighting Research & Technology*, Vol. 15, No. 4, 1983
- 3) M. Nagata, "Calculation of illuminance in concave interior by the Monte Carlo simulation", *J. Illum. Engng. Inst. Jpn.*, Vol. 72, No 10, 1987.
- 4) M. Nagata, "Calculation of illuminance distribution in the concave interior with a partition by the Monte Carlo simulation", *Trans, IEE, Japan*, Vol. 108, p 47, 1988.
- 5) R. Y. Rubinstein, *Simulation and the Monte Carlo Method*, John Wiley & Sons, 1981, New York.
- 6) J. E. Kaufman, ed., *IES Lighting Handbook : Reference Volume*, IESNA, 1984, New York.
- 7) IES Testing Procedures Committee, *IES approved method for total and diffuse reflectometry(IES LM-44-1990)*, IESNA, 1990, New York.
- 8) 지철근, 김 훈, 송 민호, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 실내면의 조도계산에 관한 연구", *조명전기설비학회지*, Vol. 6, No. 2, pp. 117-122, 1992.