

특집 : 조도계산

# Monte-Carlo Simulation을 이용한 조도 계산법

宋 民 鎬

(서울대 전기공학부 박사과정)

## 1. 서 론

사회가 발전하고 인간생활이 윤택해짐에 따라 생활이나 작업에 필요한 최소한의 밝기가 아닌 보다 쾌적하고 건강한 조명 환경에 대한 요구가 급격히 대두되고 있다. 이제는 에너지 절약의 방법을 더 이상 조명량의 희생으로부터 구할 것이 아니며 사용자의 시력보호와 작업능률의 향상, 장식적 조명등을 위하여 다양한 형태의 조명방식 개발이 연구되기에 이른 것이다. 그러나 현재 국내 소규모 건축물에 적용되고 있는 조명 방식은 대부분 설계 시공업자들의 경험이나 건축주의 감각에 의하여 결정되는 경우가 대부분이며, 체계적인 연구와 방법을 통하여 설계단계에서 조도분포를 예측하여 조명방식에 적용되는 경우는 드문 현실이다. 설계단계에서 완공후 건물내의 조도분포를 예측하는 것의 어려움은 복잡 다양화되어가는 조명환경의 요구조건을 일일이 직접적인 실험을 통하여 확인하는데 따르는 시간적, 비용적인 어려움에 있을 것이다. 과거에 대략적으로 건축물내의 조도 계산을 위하여 사용해오던 실내조도의 계산법은 표준적인 계수들을 이용하여 전체 실내면 조도의 평균치만을 구할 수 있는 것이므로 같은 공간내에서도 보다 다양한 형태의 조명방식이 요구되는 현대 건축물을 위한 해결책은 아니며 복잡한 실내구조와 마감재로 이루어지는 건축물에는 적용 자체가 어려운 방법이다.

이와 같은 기존의 어려움을 해결하는 일안으로, 컴퓨터와 수학적 모델링 기법의 발달에 힘입어, 최근 10여년에 걸쳐서 가상 모의실험을 통하여 실제로 건축물 자체나 그 모형에 대한 실험을 하지않은 상태에서도 실내면 곳곳의 조도분포를 효과적으로 예측할 수 있는 Monte-Carlo Simulation을 이용한 실내면의 조도 계산법이 제시되었고<sup>1)~3)</sup> 최근 이를 이용한 상업적인 제품도 출시되기에 이르렀다.

본 보고서는 최근 국내에서도 활발히 연구되고 있는 Monte-Carlo Simulation을 이용한 실내면의 조도 계산법의 기본원리에 대한 해설과 더불어 국내외 관련연구진의 문헌상에 발표된 그간의 연구결과를 보고하고자 한다.

## 2. Monte Carlo Simulation을 통한 조도 계산의 기본 원리

Monte Carlo Simulation이란 대상체의 행동을 확률분포에 근거하여 모델링하고 그에 따른 난수 함수(random function)를 이용한 전산모의실험(computer simulation)을 통하여 그 결과를 예측하는 방법을 통칭하는 것으로 조명계산에만 적용되는 용어는 아니다. 조도계산에서의 Monte Carlo Simulation(이하 MCS)이란 광원의 배광 분포를 수식적으로 모델링하여 그에 따라 발생된

난수함수가 광원으로부터 방사된 빛의 진행 방향이라 가정하고, 실내면의 여러 조건에 따라 모의 광의 경로를 추적하여 각 실내면의 최종 흡수 광량을 예측하는 것이다. 예를 들어 가장 간단한 배광분포 모델인 점광원을 가정하는 경우, 광원의 배광분포는 모든 방향으로 동일하다고 가정하여 그림 1과 같이 완전한 구 형태의 배광분포를 가지게 된다.

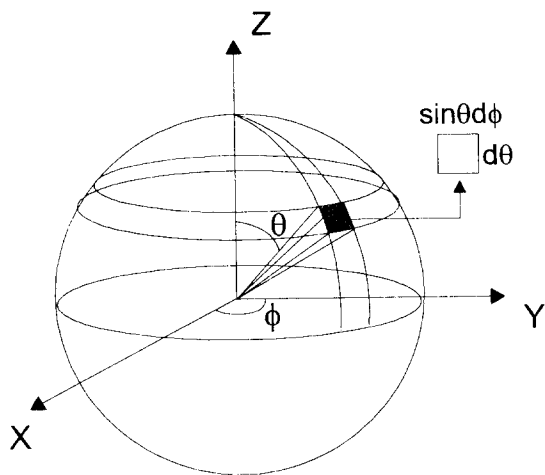


그림 1. 점광원(point source)의 배광분포

그림과 같이 완전한 구형태의 배광분포를 갖는 점광원을 사용한 경우 이 광원으로부터 방사되는 빛이 가지는 방향에 대한 확률함수  $P(\theta)$ 는 다음 식과 같이 유도할 수 있다.

$$P(\theta)d\theta = \frac{2\pi \sin\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} 2\pi \sin\theta d\theta} = \frac{\sin\theta}{2} d\theta$$

위 식과 같이 정의된 확률함수를 이용하여 광의 진행방향을 여러개의 미소단위로 설정하고 난수함수에 의해서 발생된 난수(random number)를 이 미소단위에 할당하여 그로부터 아래 식과 같이 점광원에서 방사된 모의광의 방향을 결정하게 된다( $R$ : 난수, random number).

$$\int_0^{\theta} \frac{\sin\theta}{2} d\theta = \frac{1 - \cos\theta_0}{2} = R$$

$$\therefore \theta_0 = \cos^{-1}(1 - 2R)$$

이와 같이 최초 광원에서 임의의 방향으로 방출된 빛의 입자(편의상 입자라 가정한다)는 직진하다가 경로중에 있는 실내면의 한 점에 충돌하게 된다. 충돌한 빛은 충돌한 실내면의 반사특성에 따라 반사, 또는 흡수되며, 반사할 경우 또 다시 어떠한 경로를 따라 직진하여 다른 점에 충돌하는 과정을 반복하게 된다. 물론 반사되는 빛의 입자는 모의광원에서 방사될 때와 같이 반사면의 반사특성에 따라 역시 난수함수에 의해서 결정되는 방향을 갖게 된다. 완전 확산 반사면에서 빛의 입자가 반사되는 경우를 가정할 때 아래 그림과 같은 수식적 모델링이 가능하며 광원에서 방사되는 경우와 같은 수식전개를 통하여 반사되는 각이 결정된다.

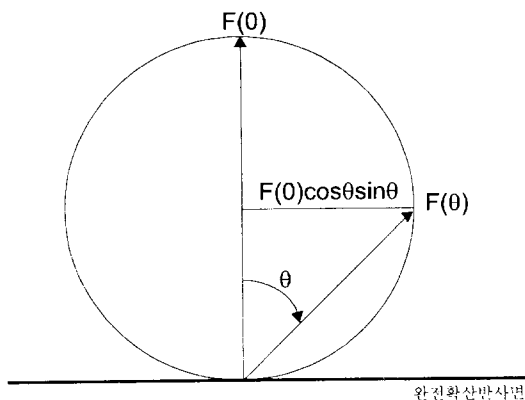


그림 2. 완전확산 반사면에서의 반사방향 결정

$$F(\theta)d\theta = \frac{2\pi F(0)\cos\theta d\theta}{\int_0^{2\pi} 2\pi F(0)\cos\theta d\theta} \cdot 2\cos\theta \sin\theta d\theta$$

위 식으로부터,

$$\int_0^{\theta} 2\cos\theta \sin\theta d\theta = \frac{1 - \cos 2\theta_0}{2} = R$$

$$\therefore \theta_0 = \cos^{-1} \frac{1 - 2R}{2}$$

와 같은 반사방향을 난수함수로부터 구할 수 있다.

흡수나 반사를 결정하는 것도 반사면의 반사율에 대하여 역시 난수함수를 발생시킨 후 이를 비

교하여 결정되어진다. 예를 들어 모의광 입자가 충돌한 충돌면의 반사율이  $\rho$ 라고 가정한다면 난수함수 R을 발생시킨 후 아래와 같은 논리연산을 통하여 흡수와 반사를 결정한다.

$$R > \rho: \text{흡수}$$

$$R \leq \rho: \text{반사}$$

이와 같은 경로의 추적은 입자가 흡수될 때까지 반복하고 이를 정해진 입자수에 대하여 반복 수행하면 작은 면적 단위로 분할된 실내면의 각 면소에 흡수된 모의광의 수를 이용하여 아래 식과 같이 각 면소의 조도를 알 수 있게 된다.

$$\text{조도} = \frac{\text{면소에 입사한 모의광의 수} \times \text{실제 광원의 방사광속수}}{\text{전체 방사 모의광의 수} \times \text{면소의 면적}}$$

이 과정을 통하여 얻을 수 있는 조도분포가 실제 값과 근접하기 위해서는 사용된 광원의 배광분포와 반사면의 반사특성이 정확히 모델링되거나 또는 수식적인 모델링이 어려운 경우 정밀한 look-up table을 이용한 연산이 수행되어야 한다. 모의실험을 행하는 과정에서 얻게되는 어려움은 실내면 자체가 복잡한 구조이거나 가구 등의 구조물들에 의해서 실내 반사면의 공간적 좌표구성이 복잡해질 경우 이를 모의실험에 적용할 수 있도록 정확하게 기하학적 모델링하는 것이다.

정확도의 향상을 계산적인 측면에서 찾는다면 최종적으로 모의광이 흡수되는 실내면을 보다 작은 면적소의 집합으로 분할할수록 공간적 조도분포의 해상도는 높아지는 것이며 모의광의 방사횟수를 크게 할수록 확률적 정확도는 높아지게 된다. 그러나 공간적 정밀도와 계산 회수를 증가시키기에 따라 가상 모의실험(computer simulation)에 소요되는 시간과 계산비용도 가파르게 증가하므로 해당 알고리즘에 맞는 적절한 연산횟수는

한계가 있다고 할 수 있다. 따라서 보다 효율적인 연산 알고리즘의 개발과, 요구되는 조도분포의 정밀도에 대한 계산회수의 최적화에 대해서도 다양한 형태의 연구가 이루어져야 할 것이다.

이상으로 개략적인 조도계산 MCS의 기초원리를 설명하였다. 물론 기술한 내용은 이해의 편의를 위하여 매우 간략화한 경우에 한정하여 언급한 것이고 실제 적용을 위해서는 매우 복잡한 형태의 광원과 실내면의 형태에 대한 모델링과 고려사항이 첨가되며 이에 대한 상세한 설명은 매우 광범위한 내용을 담아야 하므로 본 기고에서는 기술한 정도에서 기술적인 해설을 그치도록 한다.

다음 절에서는 현재까지 이루어진 국내의 연구 결과를 살피고 최근에도 활발한 연구성과를 보이고 있는 일본의 연구동향에 대하여 간략히 소개하도록 하겠다.

### 3. 국내외 연구동향

국내에서는 1992년 조명전기설비학회지를 통하여 MCS를 이용하는 실내면의 조도계산법에 대한 연구 결과가 최초로 발표된 바 있다<sup>4)</sup>. MCS의 기초이론과, 간단한 형태의 광원과 실내 구조를 가정한 전산모의실험 결과를 발표하였으며 국내에서 관련연구가 전무한 상황에서 이루어진 연구라는 것에 그 의의를 두어야 할 것이다. 이후 후속연구에서는<sup>5) 6)</sup>, 광원의 배광분포와 실내면의 반사특성을 직접 측정하고 이로부터 얻어진 특성을 전산모의실험의 기초자료로 사용하였다. 또한 전산모의실험에 적용된 실내면의 모형을 직접 제작하여 모의실험 결과와 모형을 통한 직접적인 실험결과를 비교하여 상당한 수준의 측정정밀도를 확인한 바 있으며 그 개략적 내용을

표 1. 실험을 통하여 측정된 광원의 제반특성

광 원	등기구	배광분포특성	광도(max/min)	총광속	발광부 길이
백열전구 110[V], 100[W]	없음	전반 확산	132/7	1,148	2[cm]
할로겐전구 12[V], 50[W]	Dichroic 반사갓	직접형, 투광	1,140/5	446	5[cm]
소형형광등 9[W], 전자안정기 110[V]	하면 정사각 유백색 cover	직접형	65/2	253	19[cm]

정리하면 다음과 같다.

그림 3과 표 1은 배광곡선 측정장치를 이용하여 가장 많이 사용되는 백열전구, 할로겐전구, 형광등의 광원에 대하여 광원을 중심으로 한  $\theta$ ,  $\phi$ 각을 변화시키며 그 방향의 광도를 측정하여 얻은 광원의 특성을 나타낸 것이다.

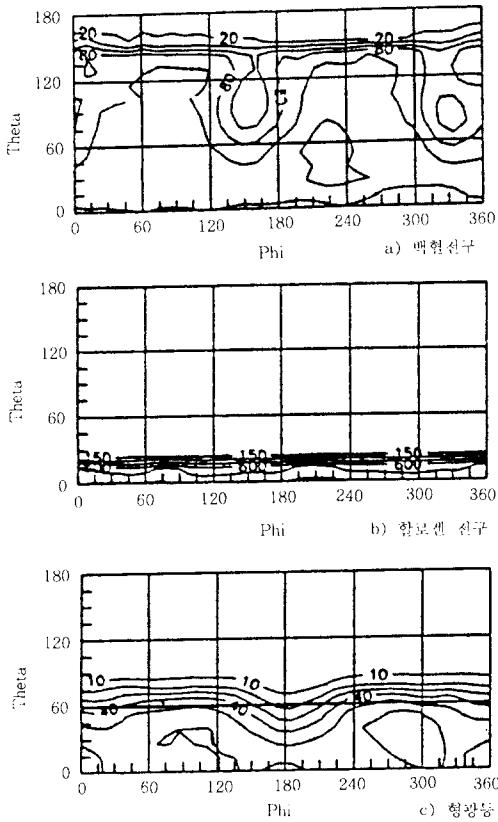


그림 3. 각종 광원의 등광도도 (a: 백열전구 b: 할로겐 전구 c: 형광등)

광원의 특성과 더불어 조도분포계산의 주요 파라미터인 실내면의 반사율 또한 다양한 색상의 마감재에 대하여 측정하였으며 미국소명위원회의 IES LM-44-1990 규정에 의한 측정결과를 표 2와 같다.

이상과 같이 실측된 자료들을 전산모의 실험의 파라미터로 대입하여 계산을 행하고 모의실험의 결과의 정확도를 검증하기 위하여 그림 4와 같은 모델(가로 1.7[m], 세로 1.0[m], 높이 0.8[m])공간을 구성하여 직접적인 실내면의 조도

표 2. 실험과 시뮬레이션에 적용된 실내면의 반사 특성

종류	반사율	특성	사 용 면
흰색	0.81	확산	2, 8, 13, 14
갈색	0.44	확산	4, 5, 6, 9, 10, 11, 15, 16
회색	0.22	확산	1
검은색	0.10	확산	3, 7, 2

측정을 수행하였다. 그림 5는 전산모의 실험과 모델실에 대하여 실측한 경우에 해당하는 바닥면의 조도분포이며 전체적으로 실험치와 계산치의 오차가 2.3[%] 이내임을 보고하고 있다<sup>6)</sup>.

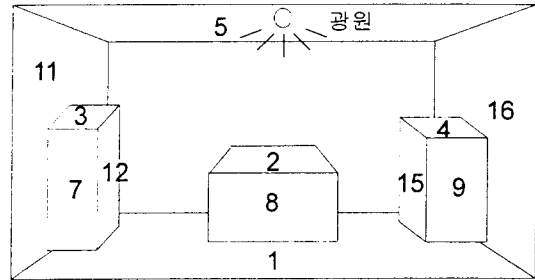
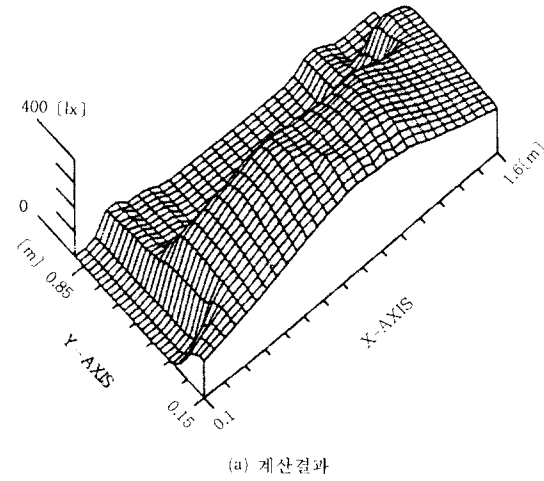


그림 4. 구성된 모델실의 구조

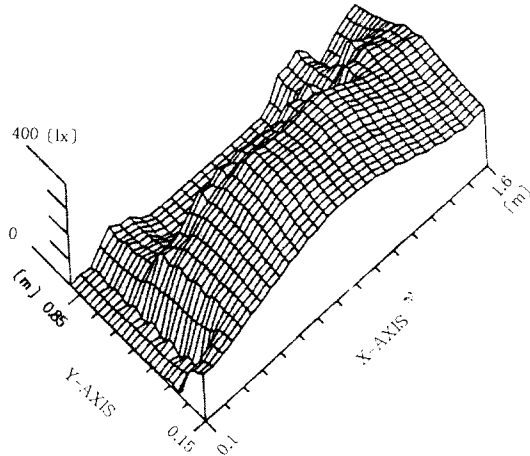
기술한 내용은 현재까지 국내에서 발표된 바 있는 MCS 조도 계산법에 대한 연구결과를 정리한 것이며 이 외에도 MCS 법을 기준으로하여 평균 조도계산법의 정확도를 비교하고 그 적용한계를 파악하는 연구결과가 발표된 예도 있다<sup>7)</sup>.

국내에서 접할 수 있는 MCS에 대한 국외 연구자료는 주로 일본의 것이며 발표된 자료에 따르면 국내에 비하여 5년 정도 앞선 연구를 하고 있다고 생각된다. M. Nagata<sup>2)</sup> 등이 구면형 실내에 대한 조도계산을 MCS를 이용하여 행한 이후로 주로 단순한 실내면의 조도 계산보다는 다양한 형태로 그 응용의 범위를 넓히고 있는 실정이다<sup>8)~12)</sup>. 특별히 관심을 갖게 하는 몇가지 연구내용을 간단하게 정리하면 다음과 같다.

현대적인 실내공간은 다양한 분광특성(spectral properties)을 가지는 광원과 실내 마감재에 의하여 단순한 백색광원에 의한 조도의 분포뿐 아니라 색감의 표현도 중요한 요소가 되고 있다. 사람은 상당히 폭넓은 시야를 가지므로 작업면뿐



(a) 계산결과



(b) 측정결과

그림 5. MCS에 의한 계산결과(a)와 모델실에 대한 측정결과(b)의 비교

아니라 그 주위 공간의 시각적 환경 또한 작업환경을 결정하는 요소가 된다. 따라서 작업면과 더불어 그 주위공간에 대해서도 작업자가 겪게 되는 시각에 대한 3차원적인 연구는 매우 중요한 일이다. 그림 6과 7은 공간내의 3차원적인 색분포를 측정하기 위하여 모델공간을 1000개의 단위 체적소로 나누고 각 체적소의 6면에 대한 색분포를 MCS를 이용하여 측정한 연구결과이다<sup>1)</sup>. 기존에 국내에서 행해졌던 연구는 대부분 그 계산의 결과가 작업공간이나 실내면에 대한 2차원적인 조도분포에 그쳤던 것과 비교한다면 진일보한 연구형태라 할 것이다.

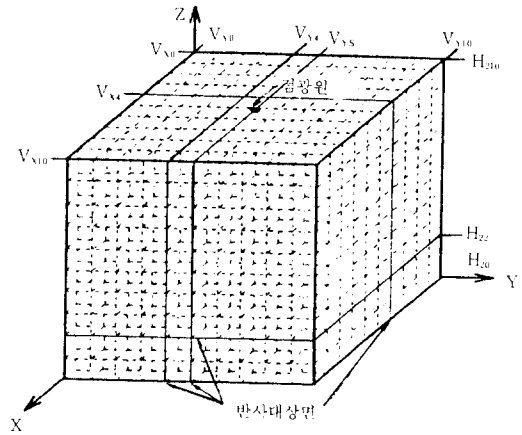


그림 6. 1000개의 기상 단위 체적소로 구성된 MCS모델

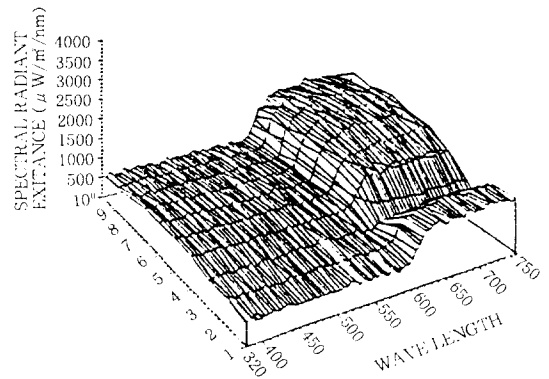


그림 7. 모델실의 공간적 위치에 대한 색도와 광도의 분포

이외에도 지금껏 MCS에서 사용되어진 ray tracing method, 즉 모의광원에서 방사된 입자가 각 반사면으로부터 단일 방향으로 반사되는 것을 가정한 방법, 의 문제점을 보완하는 radiosity method와 bidirectional ray tracing method, 또는 이를 발전시키는 방법들이 꾸준히 발표되고 있고 이들을 이용하여 사용자가 받는 느낌을 보다 실제에 가깝게 하고자하는 시도가 계속되고 있다. MCS를 실내공간의 조도분포를 예측하는 응용외에 대기중의 입자에 의하여 산란되는 광선호의 해석에 적용된 경우가 있는데 이와 같은 응용은 특별히 공항 활주로의 신호등이 안개나 먼지와 같은 대기중의 입자에 의해서 어떠한 형태로 인식될 수 있는지를 연구하는 것에 효과적으로 적용되고 있다<sup>11) 12)</sup>.

#### 4. 결론

이상에서 간단하게나마 최근 효과적인 조도분포 예측 방법으로 각광받고 있는 Monte Carlo Simulation에 대한 기초적인 원리와 국내외의 관련연구 진행정도를 알아보았다. 사실 국내에서 관련연구가 활발히 진행되기 위해서는 산업계에 이러한 연구결과가 적용되면서 그에 따른 문제점을 계속 해결해나가는 방향으로 연구가 이루어져야 하겠으나 국내 산업계의 인식 부족과 연구인력의 부족 등에 의하여 장애를 받고 있는 상황이다. 그러나 서론에서 기술한 바와 같이 사회가 발달하고 인간생활이 윤택해질수록 인간생활에서의 또는 작업환경에서의 쾌적한 조명은 더욱 그 중요성을 더해갈 것이며 이를 실현하기 위한 한가지 방법으로서 Monte Carlo 조도계산법을 이용하는 조명설계는 이후 그 중요성을 더해갈 것이다.

#### 참 고 문 헌

- 1) P. R. Treganza, "The Monte Carlo method in lighting calculations," Lighting Research & Technology, Vol. 15, no. 4, 1983.
- 2) M. Nagata, "Calculation of illuminance distribution in the concave interior by the Monte Carlo simulation," J. Illum. Engng. Inst. Jpn., Vol. 72, no.10, 1987.
- 3) 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.
- 4) 지철근, 김훈, 송민호, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 실내면의 조도계산에 관한 연구," 조명 전기설비학회지, Vol. 4, No. 2, pp. 117~122, 1992.
- 5) 김훈, "몬테카를로법을 이용한 실내조도 계산," 조명 전기설비학회지, Vol. 6, No. 5, pp. 341~348, 1992.
- 6) 김희철, 김훈, 지철근, "몬테카를로 시뮬레이션을 이용한 다면 공간의 조도계산," 조명 전기설비학회지, Vol. 7, No. 6, pp. 417~423, 1993.
- 7) 김훈, 김창섭, 심상만, "몬테카를로 시뮬레이션을 기준으로한 조도 계산법의 정확도 평가," 조명 전기설비학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 139~147, 1996.
- 8) M. Nagata, E. Iki, and N. Shimomura, "An attempt to represent three-dimensional color distribution in lighting room using Monte Carlo Simulation," J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 79, No. 11, pp. 656~664, 1995.

- 9) M. Suzuki, N. Yoshimura, O. Kimura, and M. Awata, "Monte Carlo Simulation for color changes caused by an inter-reflection light," J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 78, No. 2, pp. 107~113, 1994.
- 10) M. Suzuki, N. Yoshimura, O. Kimura, and M. Awata, "Influence evaluation for color change caused by inter-reflection in an idealized infinite interior," J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 76, No. 10, pp. 530~535, 1992.
- 11) Y. Aoki, T. Taniguchi, T. Irikura, "Analysis of space distribution of the scattered daylight by Monte Carlo Method in consideration of atmospheric particles-Numerical simulation of the scattered daylight in cloud -," J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 79, No. 8A, pp. 408~415, 1995.
- 12) Y. Aoki, T. Taniguchi, and T. Irikura, "Computer graphic simulation of light signal system including light scattering by atmospheric particles(Part 1). - Accuracy of Monte Carlo Simulation of lamplight scattering -," J. Illum. Engng. Inst. Jpn. Vol. 80, No. 2, pp. 81~88, 1996.

#### ◆ 著 者 紹 介 ◆



송 민 호(宋民鎬)

1968년 8월 26일생. 1990년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1992년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 1997년 8월 서울대학교 전기공학부 졸업예정(박사).