《연구논문》 Korean Journal of Optics and Photonics, Volume 22, Number 2, April 2011 DOI: 10.3807/KJOP.2011.22.2.083

광선추적법 기반의 적분구 분석 시뮬레이터에서 OpenMP 지시어를 이용한 속도 향상 및 몬테카를로 방법의 무작위성 보장

김승용 · 김대찬 · 오범환 · 박세근 · 이일항 · 이승걸†

인하대학교 정보통신공학과 집적형광자기술연구센터(OPERA)
㉾ 402-751 인천광역시 남구 용현4동

(2011년 1월 10일 받음, 2011년 3월 7일 수정본 받음, 2011년 3월 21일 게재 확정)

광선추적법을 기반으로 하는 적분구 분석 시뮬레이터의 계산속도를 향상하기 위하여 OpenMP 지시어를 이용한 병렬처리 방식의 시뮬레이터를 개발하였으며, 몬테카를로 방법의 무작위성을 보장하기 위해 병렬 난수 발생기인 RngStream 패키지를 활용하였다. 10^7 개 이상의 광선 수를 사용하여 0.5%의 오차 범위에서 적분구 이론식과 일치하는 결과를 얻을 수 있었으며, 스레드 수에 따른 계산속도 향상 효과를 확인하였다. 또한 적분구 문제에 관한 공간반응분포함수(spatial response distribution function)을 전산모사하여, 기존 문헌의 결과와 일치함을 확인하였다.

Improving the Calculation Speed of Ray-tracing Based Simulator for Analyzing an Integrating Sphere with OpenMP Directive and Guaranteeing the Randomness of Monte Carlo Method

Seung-Yong Kim, Dae-Chan Kim, Beom-Hoan O, Se-Geun Park,
El-Hang Lee, and Seung Gol Lee†

Optics and Photonics Elite Research Academy (OPERA), INHA University,
253 Yonghyun-Dong, Nam-Gu, Inchon 402-751, Korea

(Received January 10, 2011; Revised manuscript March 7, 2011; Accepted March 21, 2011)

In order to improve the calculation speed of an integrating-sphere simulator based on a ray-tracing method, parallel processing with OpenMP directive was implemented into the simulator and the randomness of Monte Carlo method was guaranteed by utilizing a parallel random number generator. It was confirmed that simulation results obtained with more than 10^7 rays showed good agreement with theoretical results within the error range of 0.5%, and that the calculation speed improved as the number of threads increased. Finally, the spatial response distribution functions of a real integrating sphere were simulated and compared with previous results.

Keywords: Integrating sphere, LED, Total luminous flux, Ray tracing, OpenMP directive
OCIS codes: (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology; (120.3150) Integrating spheres

I. 서 론

최근 많은 관심을 받고 있는 light-emitting diode(LED) 제품의 품질 관리와 성능 향상을 위해 LED의 광 특성을 정확하게 측정하고 평가하는 기술은 매우 중요하다.[1] LED의 광 특성 중에서 가장 중요한 전광선속(total luminous flux)은 흔히 배광측정기(goniophotometer)나 적분구(integrating sphere)를 이용하여 측정된다.[2] 배광측정기는 전광선속 뿐만 아니라 배광 분포를 측정할 수 있지만, 측정시간이 길고 구조적으로도 복잡하기 때문에 대부분 적분구를 이용한 전광선속 측정이 선호되고 있다.

적분구를 이용하여 검사 광원(test source)의 전광선속을 결

†E-mail: sglee@inha.ac.kr
Color versions of one or more of the figures in this paper are available online.

정하는 방법으로는 표준 램프를 이용하는 치환법(substitution method)과[3] 외부 광원을 이용하는 절대 적분구법(absolute integrating sphere method)[4]이 있다. 두 방법에서는 공통적으로 전광선속을 알고 있는 표준 램프나 적분구로 입사되는 광선속(luminous flux)을 알고 있는 외부 광원에 대한 적분구 검출기 출력을 측정한 다음, 검사 광원에 대한 검출기 출력을 상호 비교하여 검사 광원의 절대 전광선속을 알아낸다. 그러므로, 검사 광원의 방출 스펙트럼 특성이나 배광 분포가 표준 램프와 다를 경우, 측정 결과가 달라지는 문제점이 있다.[5] 특히 LED의 경우는 배광 분포가 방향성을 가지며 적절한 표준 램프가 없으므로, 적분구를 이용한 측정에서 많은 오차가 발생할 수 있다. 표준 램프와 시험 광원의 불일치에서 오는 측정 오차를 해결하기 위해 공간응답분포함수(spatial response distribution function, 이하 SRDF로 표기)와 SRDF로 부터 산출 가능한 보정계수(correction factor)를 활용한다.[6] 결국 적분구를 이용한 LED의 전광선속 측정 오차를 최소화하기 위해서는 적분구 구성에 대한 SRDF 혹은 보정계수를 미리 파악하거나, 측정 조건 변화가 결과에 미치는 영향을 정확히 이해하는 것이 요구된다.

실험을 통해 직접 적분구의 특성이나 보정계수를 파악하는 것이 용이하지 않으므로, 적분구 이론에 근거한 수치해석적 접근을 통해 적분구 현상을 예측하는 것은 매우 유용할 것이다. 특히, 수치해석적 접근은 사용 목적에 맞춰 적분구를 최적 설계하는 것에도 유용하므로, 상용 광선추적(ray tracing) 프로그램이나 자체 개발한 적분구 분석 툴을 활용한 연구가 활발히 진행되고 있다.[2, 6~8] 적분구 내부를 유한개의 영역으로 분할하여 적분구 특성을 예측하는 방법은 적분구 문제를 효과적으로 다룰 수 있지만, 복잡한 구성을 갖는 적분구를 취급하는 것에 번거로움이 있다. 한편, 광선추적법을 기반으로 하는 분석 방법은 복잡한 구조를 갖는 적분구를 쉽게 정의할 수 있지만, 계산의 정확도를 높이기 위해서는 많은 수의 광선을 사용해야 하므로 계산 시간이 아주 길어지는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 LED의 전광선속 측정에 활용되는 적분구를 모델링하고 이를 통해 LED의 광 방출 특성을 분석할 수 있는 광선추적법 기반의 분석용 시뮬레이터를 개발하였다. 특히, 광선추적법의 계산속도 문제를 해결하기 위해 Open Multi-Processing(OpenMP™) 지시어(directive)를 이용하여 병렬처리를 구현하였으며, 난수 발생의 불안정성을 해결하여 몬테카를로(Monte Carlo) 방법의 무작위성을 확보하였다. 보통 사용되는 난수 발생 알고리즘은 병렬처리 과정에서 여러 스러드(thread)에 대해 상호 독립적인 난수를 발생해내지 못하므로, 스레드 별로 독립적인 난수 발생이 가능한 병렬 난수 발생 알고리즘[9]을 적용하였다. 개발된 시뮬레이터의 정확도는 적분구 이론과의 비교를 통해 확인되었으며, 참고문헌 [2]에 나와 있는 SRDF의 계산결과를 동일한 조건에서 구하여 정확도를 재차 검증하였다. 이하 본문에서는 적분구의 원리와 적분구를 이용한 측정 방법에 대하여 논의하고 그 특성을 수치해석적으로 다루기 위한 모델링 과정 및 프로그램 구현 과정을 설명하였다. 끝으로 검사 광원의 위치 변동에 따른 검출기 출력 변화를 전산모사를 통해 예측하였다.

II. 적분구 이론과 보정계수

적분구는 완전한 구 모양이며, 적분구 내부 표면은 랑베르(Lambertian) 산란 특성을 가지는 확산반사 코팅 재료로 칠해져 있다. 방출 파장에 따라 다른 종류의 확산반사 코팅 재료가 사용되며, 일반적인 적분구에는 평균 반사율이 0.95 이상인 흰색의 황산바륨($BaSO_4$)이 사용된다. 랑베르 산란은 표면에서 산란된 빛의 광도(luminous intensity) 분포가 입사광의 방향에 관계없이 표면의 법선과 산란 방향이 이루는 사이각 θ의 cosine 값에 비례하는 특성을 따른다. 적분구의 형태적 특성과 내벽의 랑베르 산란으로 인해 적분구 안에 위치한 광원에서 방출된 빛은 다중 산란의 결과로 균일한 분포를 가지게 되며, 적분구 내벽의 단위 면적당 광선속은 일정하게 된다.[10] 결국, 적분구의 어떤 위치에 검출기를 두더라도 측정되는 광선속이 모두 동일하다는 원리를 이용하여 LED의 전광선속을 측정하게 된다.

전광선속이 Φ_{in}인 점광원을 포함하는 이상적인 적분구의 경우, 내벽에 의한 다중 산란이 랑베르 산란 법칙을 따른다면 내벽의 임의의 점에서 조도(illuminance), E는 식 (1)과 같이 주어진다.[8, 11]

$$E = \Phi_{in} \frac{\rho}{1-\rho(1-f)} \frac{1}{4\pi R^2} \tag{1}$$

여기서 R는 적분구의 반경, ρ는 적분구 내벽의 반사율, f는 적분구 전체 면적에 대한 포트(port) 면적의 비를 의미하며 포트 비율(port fraction)이라 한다. 검출기의 표면 반사율 ρ_D가 적분구 내벽 반사율과 크게 다르지 않다면, 적분구의 검출기에 의해 검출되는 단위 검출면적당 출력 $\hat{p}$는 식 (2)와 같이 주어질 것이다.

$$\hat{p} = \Phi_{in} \frac{\rho}{1-\rho(1-f)} \frac{(1-\rho_D)}{4\pi R^2} \tag{2}$$

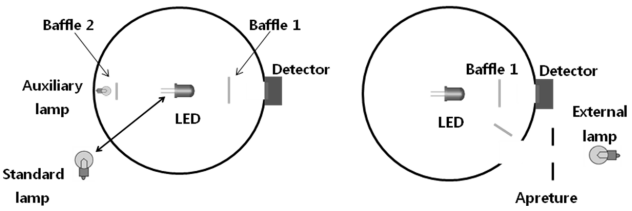


FIG. 1. Two configurations for measuring the total luminous flux of a light source with an integrating sphere. (a) Substitution method and (b) absolute integrating sphere method.

만일 $f=0$, $\rho_D=\rho$ 이라면, $\hat{p}$는 단순히 적분구의 표면 반사율 ρ에 비례하게 된다.

그림 1은 적분구를 이용한 두 가지 측정 방법에 대한 개략도이다. 그림 1(a)는 치환법[3]에 관한 것으로 적분구 내부에 표준 램프와 검사 광원을 바꿔가며 측정을 수행하는 방법이다. 표준 램프와 검사 광원을 교체하며 측정하기 때문에 적분구 내부에 존재하는 모든 구성 요소들로 인한 자체흡수(self-absorption) 효과를 보정하기 위해 보조 광원이 필요하며, 검사 광원에서 방출된 빛이 검출기로 곧바로 입사되는 것을 막기 위해 차폐막(baffle)이 필요하다. 그림 1(b)는 절대 적분구법[4]에 관한 것으로 표준 램프와 검사 광원의 교체 과정이 없으며, 외부에서 적분구로 입사되는 외부 광원의 조도 E_{ext}와 입사 개구(aperture)의 단면적 A_{ext}로부터 입사 광선속 Φ_{ext} ($=E_v \cdot A_{ext}$)을 먼저 구한다. 이어서 외부 광원에 대한 적분구 검출기 출력 p_{ext}과 적분구 내부에 위치한 검사 광원에 의한 검출기 출력 p_{int}을 비교하여 전광선속을 구하는 방법이다.[11] 절대 적분구법에 의해 결정되는 전광선속 Φ_{int}은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{\mathrm{int}} = f_s \frac{p_{\mathrm{int}}}{p_{ext}} \Phi_{ext} = f_s \frac{p_{\mathrm{int}}}{p_{ext}} E_{ext} \cdot A_{ext} \tag{3}$$

전술한 바와 같이 두 방법 모두 검출기 출력의 비를 통해 검사 광원의 절대 전광선속을 결정하기 때문에, 표준 램프와 검사 광원의 방출 스펙트럼 특성과 배광 분포가 서로 상이할 경우 전광선속의 측정값에 큰 오차가 발생하게 된다. 일반적으로 표준 램프는 전방향성 광원이기 때문에 적분구를 이용해서 LED를 측정할 경우 이러한 오차가 발생할 수 밖에 없다. LED의 전광선속을 측정하기 위해서는 보정과정이 필수적이며, 이를 위해 SRDF나 보정계수를 주로 활용한다. 배광 분포가 매우 좁은 광원의 조사 방향을 적분구 전체에 걸쳐 변화시키면서 각 조사 방향에 대한 검출기 출력을 구해 SRDF $K^*(\theta, \phi)$를 결정할 수 있다.[6] 만일 검사 광원의 상대적인 광도 분포, $I_{rel}(\theta, \phi)$를 알고 있다면, SRDF를 활용하여 해당 광원에 대한 보정계수 f_s를 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$f_s = \frac{\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} I_{rel}(\theta,\phi)K^*(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi}{\int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{\theta=0}^{\pi} I_{rel}(\theta,\phi)\sin\theta d\theta d\phi} \tag{4}$$

III. 적분구 특성 분석용 시뮬레이터 개발

적분구 분석용 시뮬레이터는 LED에서 방출된 광속을 유한개의 광선으로 취급하는 순차적(sequential) 광선추적법을 기반으로 개발되었다. 광원에서 방출된 광선과 적분구 내벽

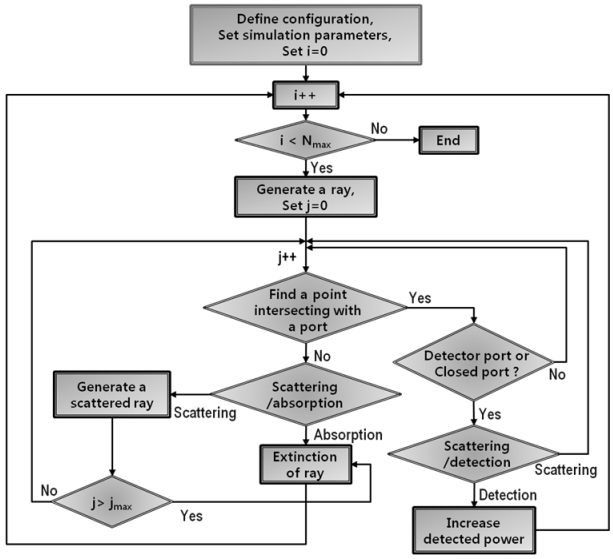


FIG. 2. Flow chart of ray-tracing algorithm implemented into the developed simulator.

혹은 내부 구성 요소와의 교점 여부를 판별하고, 해당 교점을 포함하는 표면의 반사율이나 산란 특성을 고려하여 광선의 산란 혹은 소멸을 결정한다. 표면의 법선 방향과 랑베르 산란 특성을 고려하여 산란 광선의 방향을 결정한 후, 또 다시 적분구 내벽 혹은 내부 구성 요소와의 교점 여부를 판별한다. 이러한 광선추적 과정은 광선이 최종적으로 소멸될 때까지 계속 진행된다. 이 방식보다는 산란 bidirectional reflectance distribution function(BRDF)에 따라 광선의 진행 방향을 확률적 배치하고 광선 에너지의 감소 정도를 결정하는 방식이 계산 정확도 및 속도 측면에서 유리할 수 있다. 하지만, 적분구를 활용하는 측정 과정 전체를 전산모사하기 위해서는 광선추적 과정의 단순화가 중요하므로 광선의 생존/소멸 방식을 적용하였다.

한편, 광선이 적분구 내벽과 교점을 이루는 경우, 교점이 적분구의 포트 영역 내부에 포함되는지, 해당 포트가 적분구 외부로 열려 있는 구조인지 등을 판별하여 광선의 산란과 소멸을 결정하게 된다. 끝으로 교점을 포함하는 포트가 검출기 포트(detector port)이라면, 광선과 교점을 이룰 때마다 검출기의 출력을 한 단위씩 증가시켜 준다. 광원의 전광선속이 Φ_{in}이고 전산모사에서 사용된 광선 수가 N이라면, 한 단위는 Φ_{in}/N이 된다. 이상의 광선추적 과정에 대한 흐름도는 그림 2와 같다. 적분구의 특성상 내부에서 산란이 반복적으로 일어나며, 내부 반사율이 높을수록 다중 산란은 증가할 것이다. 개발된 시뮬레이터에서는 다중 산란 회수를 인위적으로 한정하지 않았다.

광선의 생성, 소멸, 산란 여부 및 산란 방향 등이 몬테카를로 방법에 따라 모두 확률적으로 정해지므로, 정확한 전산모사를 위해서는 많은 수의 광선이 요구된다. 이로 인해 광선추적법 기반의 시뮬레이터는 일반적으로 긴 계산시간을 필요로 한다. 본 연구에서는 이 문제를 해결하기 위해 OpenMP

지시어를 이용하여 시뮬레이터를 병렬화하였다. 광선추적법의 속성상 전체 광선에 대한 광선추적을 한대의 PC에서 가용한 모든 스레드에 분산하여 처리하고, 각 스레드의 결과를 모두 통합하여 최종 결과를 얻는 것이 매우 용이하다. 이렇게 할 경우, 이론적으로는 스레드 개수에 비례하여 계산속도를 향상시킬 수 있다. 그러나, LightTools^{TM}와 같은 비결상광학계(nonimaging system)를 다루는 상용 프로그램은 비순차적 광선추적법(nonsequential ray tracing)을 주로 사용하므로, OpenMP 지시어를 이용하는 병렬처리 과정이 복잡하고 계산속도 향상도 그리 크지 않다.

몬테카를로 방법은 많은 수의 난수(random number)를 요구하는데, C 프로그램에서 흔히 사용되는 난수 발생함수 rand()는 스레드 별로 독립적인 난수를 발생하지 못하므로, 몬테카를로 방법의 무작위성을 보장할 수 없게 된다. 이를 해결하기 위해 병렬처리 과정에서도 스레드 별로 독립적인 난수를 발생시키는 병렬 난수 발생기인 “RngStream 패키지”를 접목하였다.[9]

한편, 본 시뮬레이터에서는 LED의 구성 요소인 LED chip, 반사컵, 에폭시 capsule을 설정할 수 있으며, 이를 통해 검사 LED를 가상적으로 정의할 수 있고, 정의된 LED의 배광 분포도 분석할 수 있다. LED를 정의한 다음, 적분구 규격, 포트 정보, 그리고 적분구 내, 외부에 배치될 광원 혹은 각종 광학 소자를 정의할 수 있다. 이를 통해 치환법 뿐만 아니라 절대 적분구법에서 요구되는 외부 광원, 입력 포트(entrance port) 등도 자유로이 정의할 수 있다. 한편, 차폐막은 다양한 형태와 크기로 정의될 수 있으며, 차폐막의 두께 효과도 전산모사 과정에서 고려할 수 있다.

IV. 시뮬레이터의 검증

개발된 시뮬레이터의 타당성과 계산속도 향상을 확인하기 위해 그림 3과 같은 단순 구조의 적분구를 정의하여 여러 조건에서 검출기 출력을 전산모사하였다. 적분구 반경은 150 mm이고 검출기는 적분구의 북극점에 위치한다. 입력 포트를 정의하는 경우, 포트 중심은 편각(polar angle)이 $\theta = 60°$인 위치에 놓인다고 가정한다. 차폐막은 두께가 1 mm인 원판형으로 적분구 중심으로부터 검출기 방향(+z 축)으로 높이 90 mm인 곳에 배치된다. Nichia 사 LED 제품(NSPW 300DS)를 모델링하여 가상적으로 시험 광원을 정의하였으며, 시험 광원은 적분구 중심에 위치하고 그 전광선속은 편의상 100 lumen이라고 가정하였다. 전산모사의 목적에 따라 차폐막이나 입력 포트가 정의되지 않을 수도 있으며, 적분구 내벽, 차폐막, 그리고 검출기 표면의 반사율은 모두 동일하다고 가정하였다.

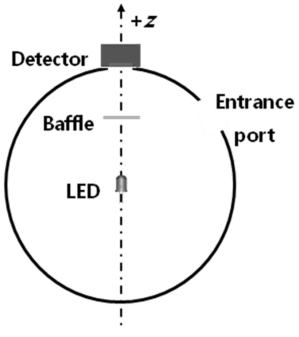
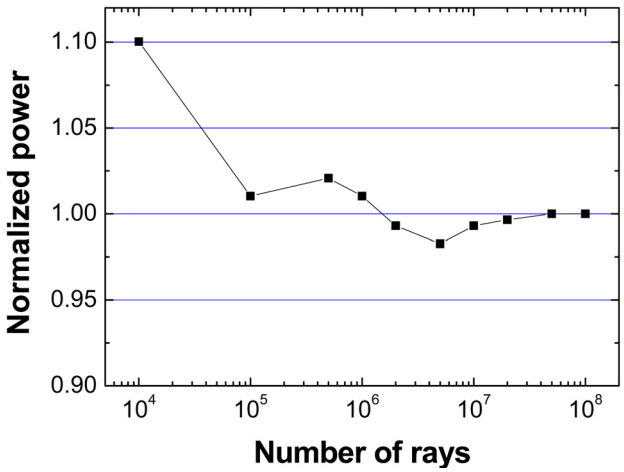
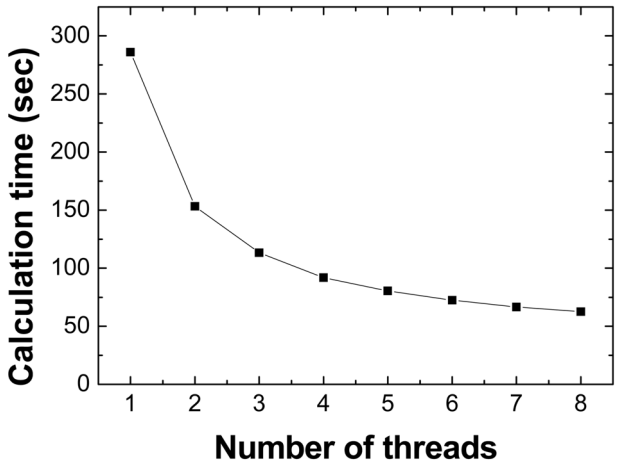


FIG. 3. Configuration of a simple integrating sphere.

우선, 전산모사에서 요구되는 적정 광선 수를 파악하기 위해 광선 수 증가에 따라 검출기 출력이 어떻게 안정화되는가를 확인하였다. 입력 포트와 차폐막이 존재하지 않으며 LED의 출력광속은 적분구의 적도면($\theta = 90°$)을 향한다고 가정하였다. 적분구 내벽의 반사율이 0.95인 경우에 대해, 광선 수를 10^4개부터 10^8개까지 증가시키면서 검출기의 단위 검출면적당 출력 $\hat{p}$을 구하였다. 그림 4(a)에 최종 수렴값으로 정규화한 단위 검출면적당 출력 $\hat{p}$을 나타내었으며, 광선 수가 5×10^7개 이상이면 출력이 안정화됨을 확인할 수 있다. 반사



(a)



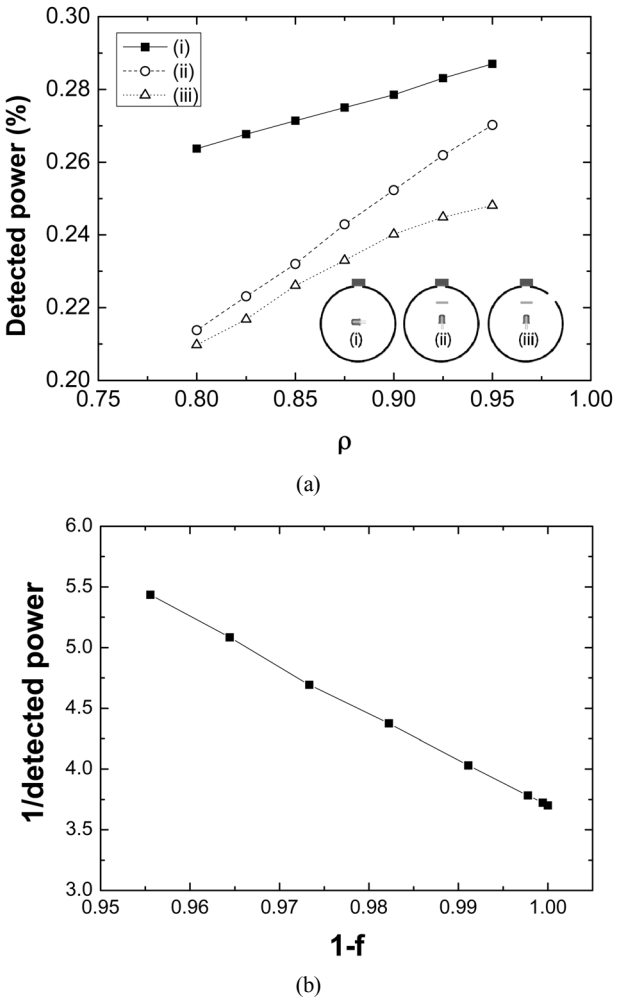
(b)

FIG. 4. (a) Convergence of the detected power with the number of rays and (b) dependency of the calculation time on the number of threads.

율이 0.85인 경우에 대한 전산모사 과정에서도 같은 결과를 확인할 수 있었다. 반사율에 관계없이 전산모사를 통해 얻어진 수렴값은 0.5%의 오차 범위 내에서 식 (1)로부터 예측되는 이론값과 잘 일치하였다.

OpenMP 지시어를 이용한 병렬처리의 계산속도 향상을 확인하기 위해 5×10^7개의 광선에 대해 그림 4(a)에 보여진 하나의 결과값에 대한 계산 시간을 살펴보았다. 사용된 PC의 CPU는 2.8 GHz로 동작하는 Intel CoreTM i7으로서 스레드 수는 최대 8이며, 운영체계는 32비트 윈도우 7 엔터프라이즈 K이고, 내장 메모리(RAM)는 4 Gbyte이었다. 스레드 수를 1부터 8개로 인위적으로 조정하여, 각 경우의 계산 시간을 구해 그림 4(b)에 나타내었다. 최대 4.6배의 속도 향상을 얻을 수 있었으며, 그 개선 효과는 스레드 수가 커짐에 따라 점차 둔화되는 것을 확인할 수 있었다.

다음으로 광선 수를 1×10^8개로 고정한 채 단위 검출면적당 출력 $\hat{p}$가 적분구 내벽 반사율 ρ에 따라 어떻게 변화하는 지를 살펴보았다. 그림 5(a)에 나타낸 전산모사 결과에서 (i)로 표시된 그래프는 그림 4와 동일한 적분구 구조에 대한 결과이다. 그림 3의 적분구 구조처럼 차폐막이 있고 차폐막을 향해 LED 출력광속이 방출되는 경우에 대한 전산모사 결과는 그래프 (ii)와 (iii)과 같으며, 특히 그래프 (iii)의 경우는 포트 반경이 20 mm인 입력포트가 도입된 경우이다. 그래프 (i)와 (ii)는 포트 비율이 0인 경우로서 식 (1)에서 예측되는 바와 같이 내벽 반사율이 증가함에 따라 출력 $\hat{p}$도 선형적으로 증가하였다. 하지만, 포트 비율 f가 0이 아닌 경우 즉 그래프 (iii)의 경우는 선형적인 관계를 보이지 않았다. 포트 비율 f에 따른 출력 $\hat{p}$의 변화 경향을 명확히 확인하기 위해 입력 포트의 반경을 0에서 45 mm까지 변화시키며 출력 $\hat{p}$를 구하였다. 그 결과는 그림 5(b)에 나타내었으며, 식 (1)과의 비교를 위해 그래프의 가로축은 1-f 로, 세로축은 출력 $\hat{p}$의 역수로 각각 표현하였다. 그림 5(b)에서 출력의 역수와 1-f가 선형 관계임을 확인할 수 있으며, 이는 식 (1)로부터 예측된 것과 일치한다.



(a)

(b)

FIG. 5. (a) Variation of the detected power to the surface reflectivity and (b) variation of the inverted power to 1 - f (port fraction).

이상의 검증 과정을 통해 개발된 시뮬레이터가 앞서 정의된 수학적 모델에 따라 적분구 문제를 정확히 예측해 냄을 알 수 있었다. 보다 복잡한 구조에 대한 계산의 정확도를 확인하기 위하여 전산모사 결과를 참고문헌 [2]의 결과와 비교 평가하였다. 참고문헌 [2]에서 사용된 적분구는 그림 6과 같으며, 그림에 표시된 수치들은 모두 mm 단위를 갖는다. 그림 6(a)는 적분구 내부에 하나의 차폐막이 존재하는 단순 구조이며, 그림 6(b)는 상대적으로 복잡한 구조로서 세 개의 포트(검출기 포트, 입력 포트, LED holder)와 두 개의 차폐막을 가지는 적분구이다.

먼저 그림 7(a)는 그림 6(a)와 같이 적분구를 정의하고 적분구의 모든 구성 요소의 반사율 ρ를 0.80~0.95 범위로 변화시켜가며 개발된 시뮬레이터를 이용하여 SRDF를 계산한 결과이다. 5×10^7~2×10^8개의 광선을 사용하였으며, 하나의 SRDF 곡선을 구하는데 소요된 시간은 약 3시간이었다. 참고문헌 [2]에 제시된 동일 조건에 대한 계산 결과와 비교해 보면, 경향성은 정확히 일치하였지만, 참고문헌 [2]에서 반사율 0.95에 대한 계산 결과가 반사율이 0.92일 때의 본 연구 결과와 일치한다는 점에서 구체적인 값은 약간 차이를 보였다. 한편, 동일한 정확도의 결과를 얻기 위하여 소요된 계산 시간을 비교하면 참고문헌 [2]에서는 광선 추적법으로 10^6 개의 광선을 사용하여 계산을 수행하는 경우에 대략 3일이 소요됨에

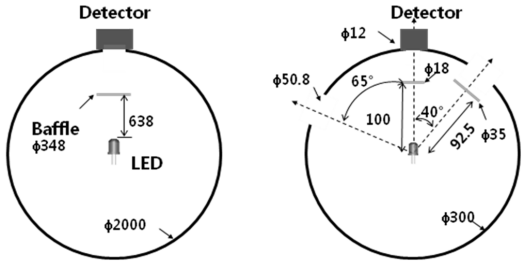
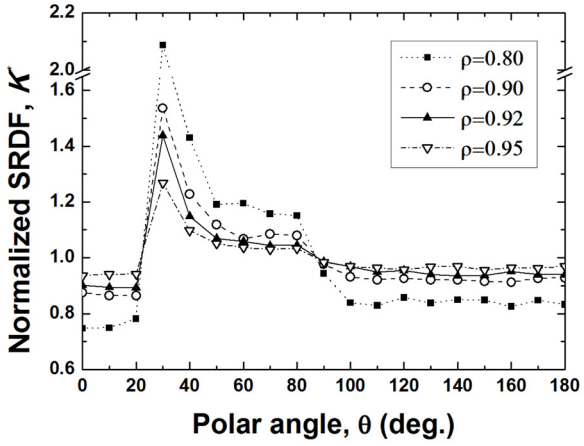
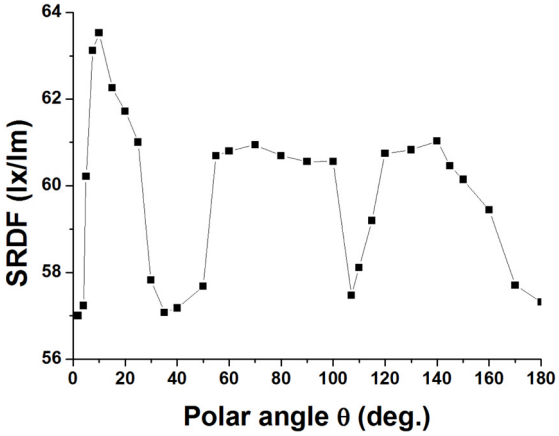


FIG. 6. Configurations of two integrating spheres for calculating spatial response distrbution function.



(a)



(b)

FIG. 7. Calculated SRDF curves. (a) SRDFs of the integrating sphere shown in Fig. 6(a), and (b) those of the integrating sphere shown in Fig. 6(b).

비하여 본 연구에서는 약 3시간으로 계산시간이 크게 단축됨을 확인할 수 있었다.

그림 7(b)에 그림 6(b)의 적분구에 대한 계산 결과를 보였다. 본 연구에서는 ϕ를 90°로 고정한 채 0°~180°의 θ에 대한 SRDF 만을 계산하였으며, 비교를 위해 $\theta = 0°$의 계산 결과가 참고문헌 [2]의 계산 결과와 같도록 다른 모든 계산 결과를 비례 환산하였다. $\theta = 120°$~$140°$ 근방에서 참고문헌 [2]의 결과와 약간 차이를 보이긴 하지만, 전체적으로 두 결과는 거의 일치함을 알 수 있다. 이상과 같이 두 가지 경우에 대한 전산모사의 결과를 비교함으로써 본 연구에서 개발된 시뮬레이터가 기존 결과와 일치하는 신뢰성을 가짐은 물론, 광선의 개수를 10^8개 이상으로 사용하여 SRDF의 오차를 줄이면서도 계산 시간을 획기적으로 단축할 수 있음을 확인하였다.

적분구를 이용한 전광선속 측정에서는 시험 광원의 방출 스펙트럼이나 배광 분포와 같이 시험 광원의 자체 특성에 따라 측정 결과가 달라질 수도 있지만, 시험 광원의 위치나 방향 등과 같이 측정 조건에 따라서도 측정 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 검사 LED의 위치 및 적분구 내

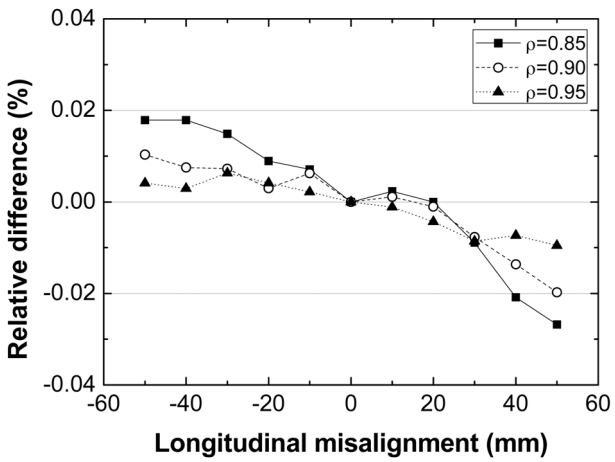


FIG. 8. Relative differences of the detected power acoording to the longitudinal misalignment of a test LED for several surface reflectivities.

벽 반사율에 따라 단위 검출면적당 검출기 출력이 어떻게 변화하는 지를 전산모사하였다. 그림 6(a)와 동일한 구조를 갖는 적분구에 대하여 적분구, 검출기 및 차폐막의 반경을 각각 150 mm, 6 mm, 9 mm인 조건에서 LED 위치를 적분구 중심을 기준으로 상하 50 mm 범위에서 변화시키며 검출기 출력을 구하였다. 즉, 종방향 배열 오차(longitudinal misalignment)의 영향을 살펴보았으며, 차폐막 반경이 검출기 포트 반경보다 크므로 어떤 경우에도 LED 출력광이 검출기 포트로 직접 입사되는 경우는 발생하지 않는다. 검사 LED가 중심에 있을 때의 검출기 출력을 기준으로 모든 계산 결과를 상대차이(relative difference)로 환산하여 그림 8에 나타내었다. LED가 차폐막으로부터 멀어지는 경우에 비해 가까워지는 경우에 상대차이가 더 빠르게 증가함을 확인할 수 있었다. 검사 LED가 차폐막에 가까워질수록 차폐막에 의해 가려지는 입체각이 증가하므로 차폐막이 필요 이상으로 크게 정의된 것과 같은 효과를 나타내는 것이다. 또한 LED 위치에 따른 입체각 크기의 변화율도 가까운 경우가 먼 경우에 비해 더 큰 값을 가지게 되므로 종방향 배열 오차 역시 차폐막에 가까워지는 경우가 더 크다고 생각할 수 있다. 다음으로 반사율 변화에 따른 영향을 살펴보면, 그림으로부터 적분구 내벽 반사율 ρ가 커질수록 종방향 배열 오차의 영향이 감소함을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

광선추적법 기반의 적분구 특성 분석용 시뮬레이터가 안고 있는 계산속도 문제를 해결하기 위해 OpenMP 지시어를 이용하는 병렬처리 시뮬레이터를 개발하였으며, 최대 4.6 배의 속도 향상 효과를 얻을 수 있었다. 또한 병렬 난수 발생기인 “RngStream” 패키지를 활용하여 스레드 별로 독립적인 난수 발생을 가능케 하였으며, 이를 통해 전산모사 과정에서 활용되는 몬테카를로 방법의 무작위성을 보장해 주었다.

이상적인 적분구에 대한 전산모사 결과와 이론식의 비교를 통해 5×10^7개 이상의 광선을 사용하는 경우에 0.5%의 오차 범위 내에서 타당한 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. LED의 전광선속 측정에 활용되는 적분구 특성을 나타내는 SRDF를 두 가지 적분구 구조에 대해 전산모사하여 참고문헌 [2]과 비교하여, 동일한 경향성을 확인할 수 있었다. 끝으로 전광선속 측정과정에서의 오차 유발 요인인 검사 LED의 정렬 오차가 측정 결과에 미치는 영향을 분석하였으며, 그 결과 적분구 내벽 반사율이 높을수록 정렬 오차의 영향이 상대적으로 적음을 확인할 수 있었다.

개발된 시뮬레이터는 임의의 구성 요소를 갖는 복잡한 구조의 적분구 문제에도 적용 가능하며, 최근 CPU가 멀티 코어화되는 추세이므로, 병렬처리에 의한 효과 또한 더욱 기대된다. 본 연구를 통해 적분구에 대한 이해를 돕고 산업적인 측면에서 시뮬레이터의 유용한 활용 가능성을 보여주는 한편, 이에 대한 지속적인 연구가 필요함을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 인하대학교의 지원으로 수행되었습니다. 인하대학교의 지원에 감사 드립니다. 아울러 본 연구에 참고가 된 소중한 자료를 제공해주신 한국표준과학연구원 박승남 박사에게 감사의 말씀 드립니다.

References

1. A. A. Gaertner, “Led measurement issue,” Institute for National Measurement Standards, National Research Council of Canada, (Ottawa Canada, 2002), pp. 1-15.
2. S. C. Park, J. H. Jeon, N. J. Yoo, and S. N. Park, “Calculation of spatial response distribution function of an integrating sphere for led total luminous flux measurement using a commercial Monte-Carlo ray-tracing simulator,” in *Proc. CIE Session 2007 D2 Conference* (Beijing, China, 2007), pp. 37-40.
3. J. Hovila, K. Lahti, P. Toivanen, and E. Vahala, Annual Report 1999 (Metrology Research Institute, Helsinki University of Technology, Finland, 2000), pp. 20-25.
4. Y. Ohno, “Realization of NIST 1995 luminous flux scale using integrating sphere method,” J. of Illuminating Engineering Society **25**, 13-22 (1996).
5. P. Hanselaer, A. Keppens, S. Forment, W. R. Ryckaert, and G. Deconinck, “A new integrating sphere design for spectral radiant flux determination of light-emitting diodes,” Meas. Sci. Technol. **20**, 1-9 (2009).
6. Y. Ohno and R. O. Daubach, “Integrating sphere simulation on spatial nonuniformity errors in luminous flux measurement,” J. of Illuminating Engineering Society **30**, 105-115 (2001).
7. Y. Ohno, “Integrating sphere simulation: application to total luminous flux scale realization,” Appl. Opt. **33**, 2637-2647 (1994).
8. M. L. Rastello, E. Miraldi, and P. Pisoni, “Luminous-flux measurements by an absolute integrating sphere,” Appl. Opt. **35**, 4385-4391 (1996).
9. P. L'Ecuyer, R. Simard, J. Chen, and W. D. Kelton, “An object-oriented random-number package with many long streams and substreams,” Operations Research **50**, 1073-1075 (2002).
10. Sphereoptics LLC, “Integrating sphere design and applications,” (Technical Information, 2007), pp. 1-4, http://www.sphereoptics.com/technical-publications.htm.
11. J. Hovila, P. Toivanen, and E. Ikonen, “Realization of the unit of luminous flux at the HUT using the absolute integrating sphere,” Metrologia **41**, 407-413 (2004).