

연산 속도가 개선된 몬테카를로 광선 추적 알고리즘 개발 및 이를 활용한 절대 반사율 측정 장치 특성 분석에 관한 연구

(A Development of Fast Speed Monte-Carlo Ray Tracing Method and Study of the Characteristics of an Absolute Reflectometer)

김한필* · 변석주 · 전민용 · 박종식

(Han-Pil Kim · Seok-Joo Byun · Min Yong Jeon · Jong-Sik Park)

Abstract

We proposed a new algorithm to improve the calculation speed of forward ray tracing method which was quite a problem in conventional Monte Carlo algorithm. To verify the accuracy and the effect of improving calculation speed, we directly compared integrating sphere characteristics with conventional ray tracing algorithm under the same condition which was referred in a reference paper. By applying new algorithm to an absolute reflectometer, we calculated the degree of errors which were caused by baffle and port characteristics to find optimal system design condition.

Key Words : Monte Carlo, Ray Tracing, Absolute Reflectance, Integrating Sphere, Reflectometer

1. 서 론

1.1 연구의 배경

물체의 정확한 색상을 측정하기 위해서 필수적으로 알아야 할 3가지 요소 중 광원의 상대 분광분포와 표준 관측자의 시감 분포는 표준값으로 이미 정의되어 있으나, 시료의 확산 분광 반사율 분포에 대한 정보는

별도의 측정을 통해 획득해야만 한다. 확산 반사율 측정을 위해서는 보통 측각계(Goniometer)를 통한 물체의 이등방 반사 분포 함수(Bidirectional reflectance distribution function; 이후 BRDF)를 구하거나, 적분구를 활용한 절대 반사율(Absolute reflectance)을 측정하는 방법을 적용하지만, 빠른 측정 시간 등의 장점으로 적분구 방식을 주로 사용하여 측정한다[1]. 하지만 적분구 방식의 경우 내부 코팅 상태를 비롯한 배플 크기 및 반사 특성 등과 같은 요인들로 인해 적분구 내부에서 빛의 분포가 균일하지 못해 상당한 측정 오차를 발생시킬 수 있기 때문에 각각의 경우에 대한 오차 발생 정도를 정확히 예측하는 것이 필요하며, 이와 관련된 연구가 선행되어 왔다. 대표적인 방법으로 적분구 내부 반사 특성이 이상적인 Lambert 법칙을 따른다고 가정 후 연속 확산 반사에 따른 무한 급수

* 주(교신)저자 : 충남대학교 물리학과/한국광기술원
* Main(Corresponding) author : Department of Physics, Chungnam National University / Korea Photonics Technology Institute
Tel : 062-605-9217, Fax : 062-605-9288
E-mail : st.kim@kopti.re.kr
접수일자 : 2014년 4월 16일
1차심사 : 2014년 4월 22일
심사완료 : 2014년 5월 12일

형태의 수치 적분을 하는 방법과 몬테 카를로 방법에 기반한 광선 추적 방법을 들 수 있으나 최근 컴퓨터 성능 향상과 더불어 적분구 내부의 실제 반사 특성(BRDF)을 반영할 수 있다는 장점 때문에 몬테 카를로 방법을 활용하는 경우가 대부분이다[2-5].

1.2 연구의 목적 및 방법

몬테 카를로 방식의 광선 추적 방식은 크게 그림 1에서와 같이 광원으로부터 출발한 광선들이 검출기까지 도달하는 전 과정을 추적하는 순 방향 방식과 거꾸로 카메라 필름과 같은 검출기를 세분화하여 해당 픽셀(Pixel)의 중심에서 출발한 광선들이 광원까지 도달하는 일련의 과정을 추적하는 역 방향 방식으로 구분되어진다. 일반적으로 검출기에 도달한 광선

수가 충분할 경우 순 방향 방식이 보다 정확한 계산 결과를 보여줄 수 있으나, 출발 광선 전체를 모두 추적하여야 하기 때문에 적분구와 같이 검출기의 크기와 광원의 크기 모두 전체 시스템 크기에 비해 매우 작으면서도 적분구 내부가 산란 특성을 갖는 경우 충분한 결과를 획득하기 위한 시간이 매우 길어지게 되어 컴퓨터 그래픽스(Graphics) 분야에 주로 사용되는 렌더링(Rendering) 기법과 같은 역 방향 방식을 적용하는 경우가 대부분이다[4]. 이에 본 논문에서는 보다 높은 정확성을 갖는 순 방향 방식의 몬테 카를로 광선 추적기법을 활용하기 위해 전통적인 알고리즘을 개선하여 정확성을 보장하면서 연산 속도를 향상시키고자 하였다. 개선된 알고리즘의 정확성을 확인하기 위해, 참고 문헌에서 제시된 결과와 비교를 실시하였으며, 연산 속도 향상 정도를 비교하기 위해 적분구 방식의 절대 반사율 측정 장치에 대해 전통적인 몬테 카를로 알고리즘 방식과 비교하였다. 또한 개선된 알고리즘을 활용하여 적분구 방식의 절대 반사율 측정 장치의 오차 발생 요인을 정량적으로 분석하여 장치의 최적화를 시도하였다.

2. Monte Carlo 방식 광선 추적

2.1 연산 속도 개선 알고리즘

전통적인 순 방향 몬테 카를로 방식의 광선 추적법은 광원으로부터 방사되는 광선이 검출기까지 도달하기 위한 일련의 과정에서 물체를 만날 때마다 다음 만날 물체의 위치를 결정하게 된다. 이 때 시스템 상에 존재하는 모든 물체들이 다음 만날 대상군에 포함되며, 이 중 가장 확률이 높은 물체를 다음 만날 물체로 결정하게 된다. 또한 물체를 만날 때마다 물체의 반사율 특성 등을 확인한 후 계산을 수행하게 되어 컴퓨터 메모리의 부담과 연산 시간 지연을 초래하게 되는 등 한계점을 노출하여 왔다[6-8].

본 논문에서는 그림 2에서와 같이 전통방식의 문제점인 물체 검색 부분과 적분구에서와 같이 동일한 산란 특성이 반복되는 상황에서 매번 물체 특성을 확인하는 작업의 최적화를 통해 연산 속도 개선과 컴퓨터

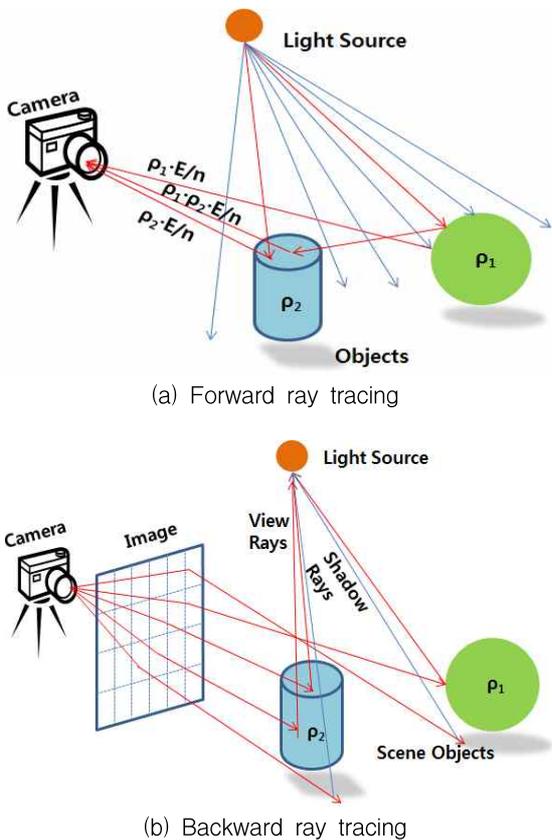


그림 1. 광선 추적 방식
Fig. 1. Ray tracing algorithm

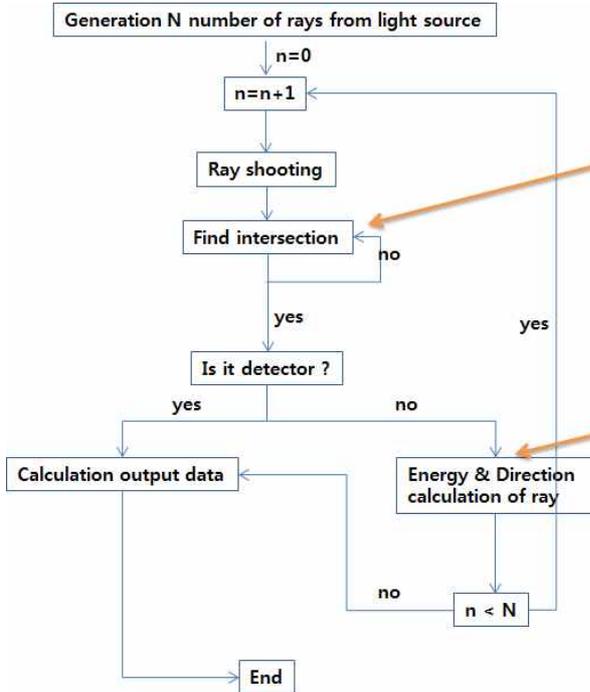


그림 2. 제안된 알고리즘
Fig. 2. Proposed Monte carlo ray tracing algorithm

Conventional Method:
All objects in the system are the target of searching for intersection.

New Method:
Only some objects located in the maximum probabilistic direction are the target of searching for intersection.

If the intersection surface has **scattering property**

Conventional Method:
The energy weight function is calculated at every intersection event.

New Method:
The energy weight function is calculated only once when the simulation is started.

메모리 부담을 줄여, 많은 수의 연산을 안정적으로 처리할 수 있는 알고리즘을 제안하였다.

2.2 알고리즘 정확성 및 연산 속도 비교

2.2.1 알고리즘 정확성 비교

제안된 알고리즘의 정확성을 검증하기 위해 일반적인 Ulbricht형 적분구에 대해 참고 문헌[11]에서 제시된 그림 3과 같은 조건으로 적분구 내부 공간 응답 분포 함수(Spatial response distribution function; 이후 SRDF)를 계산하였다. 공간 응답 분포 함수란 적분구 내부에 존재하는 배플 및 램프 홀더와 같은 물체, 구벽의 오염 및 적분구 사이의 간격 등의 이유로 발생하는 응답 특성의 불균일한 정도를 나타내는 함수로 식 (1)과 같이 표현된다.

$$K_{lp}(\theta, \phi) = \frac{E_w}{\Phi_{beam}(\theta, \phi)} \quad (1)$$

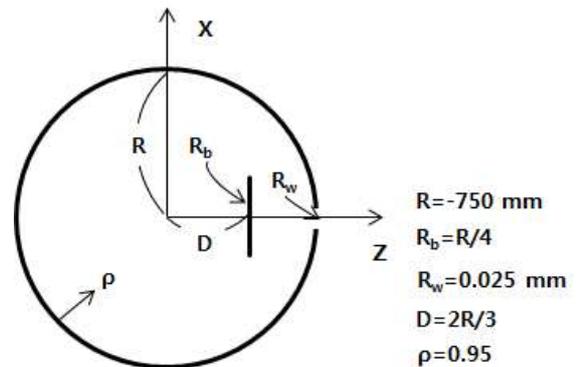


그림 3. Ulbricht형 적분구 구조
Fig. 3. Structure of Ulbricht Integrating sphere

여기서 공간 응답 분포 K_{lp} 는 적분구 내부에서 입사 광원의 각도별 출력 분포, E_w 는 검출기의 출력 결과물인 복사조도, 그리고 $\Phi_{beam}(\theta, \phi)$ 는 (θ, ϕ) 방향으로 입사되는 평행광의 광선속을 각각 의미한다[9]. 참고 문헌[11]에서는 적분구 내부가 램버시안 반사 특성을 갖는다는 가정하에 적분구 벽과 배플의 표면을 균등

분할하여 각 요소(Mesh)마다 복사 전달 방정식 (Radiative transfer equation)을 적용하여 계산하는 수치 해석 방법을 적용하였으며[10], 이 결과에 준해 전통적인 방식과 새롭게 제안된 방식 모두 $\theta = 0^\circ$ 방향에 대해 $\Delta\phi = 3^\circ$ 기준으로 계산을 실시하였다. 이를 위해 적용된 기본 조건으로는 무한 연산을 피하고 계산 시간을 제한하기 위해 출발 광선수는 3×10^6 , 추적 중단 함수를 $E_0 \cdot 10^{-5}$ 으로 제한하였다.

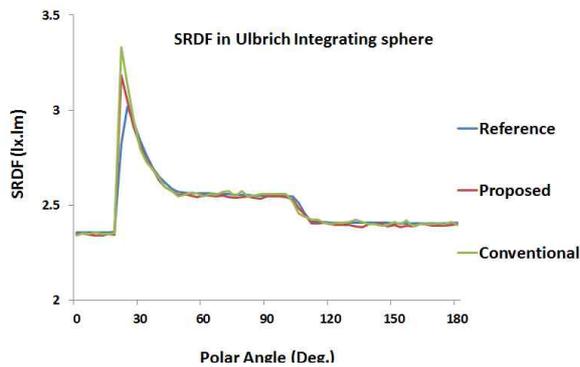


그림 4. SRDF 연산 결과
Fig. 4. SRDF calculation result

그림 4의 결과를 보면 배플에 의한 영향이 반영된 $\phi = 30^\circ$ 지점을 제외하고 상호간의 데이터가 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. $\phi = 30^\circ$ 지점에서의 차이는 몬테 카를로 방식 고유의 문제로서 변곡점에서는 다른 부분보다 상대적으로 적은 검출 데이터를 확보하기 때문에 발생하는 문제이며, 해당 지점에 대해서 보다 많은 광선 추적을 실시하면 해결될 수 있는 문제이다. 결국 동일한 수의 광선 추적을 실시한 결과 $\phi = 30^\circ$ 지점을 기준으로 전통적인 방식에 수치 해석을 바탕으로 한 데이터와 비교해서 새롭게 제안된 방식이 약 5.2% 정확함을 확인하였으며, 이는 다음번 물체 검색 시 진행되는 광선의 방향성의 최적화로 검출기로 도달하는 광선 수가 증가했기 때문으로 해석된다.

2.2.2 알고리즘 연산 속도 비교

Sharp-Little 적분구형 절대 반사율 측정 장치는 외부 입사광이 직접 적분구 내벽을 비춘 후, 해당 입사 면적에 상응하는 1차 반사 부위가 제 2의 광원 역할을

수행하면서 적분구 내벽을 향해 고르게 확산 반사를 통해, 제 2, 제3 광원 역할을 하도록 구성되어 있어 몬테 카를로 방식을 적용하기 적당한 광학계이다.

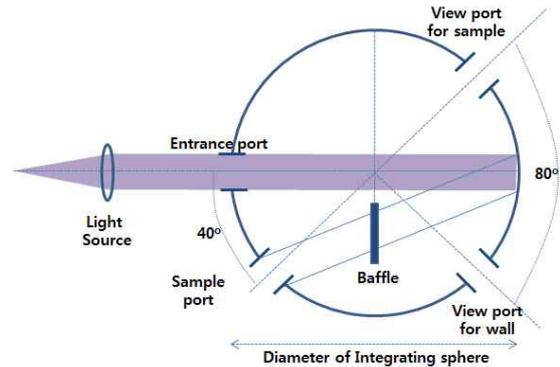


그림 5. Sharp-Little 절대 반사율 측정 장치
Fig. 5. Sharp-Little reflectometer

이에 따라 전통적인 방식과 새롭게 제안된 알고리즘에 대하여 표 1에서 제시된 것과 같은 조건으로 연산 속도를 비교하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

표 1. Sharp-Little 방식의 주요 인자
Table 1. Parameters of Sharp-Little type

	Parameter	Set value
Integrating Sphere wall	Radius	100
	Reflectance	0.95 (Lambertian)
Sample	Radius	12.5
	Reflectance	0.95 (Lambertian)
	Thickness	12.5
Port	Reflectance	0
	Radius	14.5
	Thickness	1
Baffle	Reflectance	0.95 (Lambertian)
	CPU	i7 3.40 GHz
	Starting rays	3×10^6
Simulation condition	Trace off ratio	10^{-6}
	Detector size	12.5
	Meshes of detector	5×5

표 2. 연산 속도 비교
Table 2. Comparison of calculation speed

Algorithm	Conventional	Proposed
Data		
Elapsed time(s)	1,740	201

표 2에 나타난 결과를 보면, Sharp-Little 방식의 적분구에 대해 새롭게 제안된 알고리즘이 약 8.7배 빨라짐을 알 수 있다. 전통적인 방식에서 표 1에서의 조건으로 약 30분 정도 소요가 되나, 충분한 정확성을 보장하기 위해 보다 많은 수의 광선을 추적할 경우 체감 속도 차이는 훨씬 크게 나타날 수 있음을 고려할 때, 8.7배의 연산 처리 속도 향상은 상당한 의미를 지닌다고 판단된다.

3. 적분구를 활용한 절대 반사율

본 장에서는 제안된 알고리즘을 활용하여 2.2.2절에서 살펴본 Sharp-Little 방식의 절대 반사율 측정 장치에 대한 주요 오차 발생 원인으로 지적되는 배플의 크기, 위치 및 반사 특성과 포트면 특성에 대한 분석을 실시한 후 구조적인 계통 오차가 가장 작게 나타날 수 있는 조건을 도출하고자 한다. 오차 산출 방법으로는 측정하고자 하는 샘플의 반사율을 초기에 95%로 설정한 후 연산 과정을 통해 각각의 관측 지점에서 도출된 적분구 내벽과 샘플간의 복사 휘도 비율을 바탕으로 샘플의 절대 반사율을 산출하여 초기 설정 값과의 차이를 계산하였다.

3.1 Sharp-Little 방법 소개

Sharp-Little 방식에 따르면, 샘플을 제외한 적분구 내벽은 1차 반사에 의한 직접 반사 성분과 기타 부분에 의한 다중 반사 성분에 의한 결과를 모두 반영하지만, 샘플의 경우 배플의 영향으로 1차 반사에 의한 성분(E_1)을 제외한 다중 반사 성분 결과만을 반영하게 된다. 이에 따라 포트들의 크기가 충분히 작을 경우 샘플과 적분구 내벽에 의한 복사 휘도 비율을 통해 측정하고자 하는 샘플의 반사율(ρ_1)을 식 (2)~(5)의 과

정을 통해 알 수 있다.

$$k = \frac{B_s}{B_w} = \frac{\rho_1 E_s}{\rho_2 E_w} \tag{2}$$

- ※ B_s : 샘플의 복사 휘도,
- B_w : 적분구 내벽의 복사 휘도
- ※ E_s : 샘플의 복사 조도,
- E_w : 적분구 내벽의 복사 조도

적분구 내벽의 복사 조도는 내벽의 반사율(ρ_2)이 적용된 복사선속의 무한 급수로 표현될 수 있으며, 샘플에서의 복사 조도는 내벽의 복사 조도에서 배플의 영향에 의한 최초 입사 광원에 의한 성분을 뺀 값과 같으므로, 다음과 같이 표현될 수 있다[4].

$$E_w = \Phi_1 (1 + \rho_m' + \rho_m' \rho_m + \rho_m' \rho_m^2 + \dots) / a_0$$

$$= \frac{\Phi_1}{a_0} \left[\frac{a_0 - a_1 (\rho_1 - \rho_2)}{\Sigma a_i (1 - \rho_i)} \right] \tag{3}$$

$$E_s = E_w - E_1 \tag{4}$$

$$\rho_1 = k \frac{\rho_2 E_w}{E_s} = k \frac{(a_0 + a_1 \rho_2)}{(a_1 + k a_1 + a_2)} \tag{5}$$

- ※ a_0 : 적분구 내벽의 전체 면적 ($4\pi r_0^2$)
- a_1 : 샘플의 면적
- a_2 : 샘플과 Viewing port들을 제외한 면적
- ρ_1 : 샘플의 반사율
- ρ_2 : 적분구 내벽의 반사율
- E_1 : 1차 반사에 의해 발생된 복사 조도

3.2 적분구 배플 설계에 따른 특성 변화

적분구에서 1차 반사된 직접광이 샘플로 직접 향하여 비정상적인 결과를 생성할 경우를 방지하기 위하여 배플을 설치한다. 하지만 배플 자체가 적분구 내부의 불균일성을 향상시키는 역할을 하기 때문에 배플의 영향을 정확히 파악할 필요가 있다. 이를 위해 그

림 6 및 표 3의 조건에 따라 오차 발생 정도를 산출하였다.

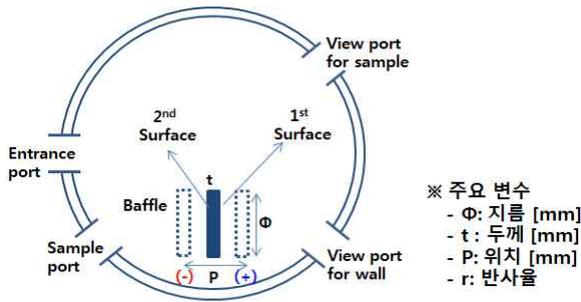


그림 6. 배플 특성 조건
Fig. 6. Conditions of baffle characteristics

표 3. 배플 특성 조건에 따른 오차
Table 3. Errors from the condition of baffle characteristics

	Φ (지름)	t (두께)	P (위치)	r (반사율)	Error (%)
A	29	1	0	0.95 Lambertian	1.38
B	25	1	0		1.55
	33				1.84
C	29	4	0		1.60
		7			1.50
		10			1.08
D	29	1	-10		1.53
			-5		1.51
			5		1.33
			10		1.41
E	29	1	0	0.95 Specular (1 st surface)	1.19
			0	0.95 Specular (All surfaces)	1.43

표 3에서 나타난 조건별 오차 발생 정도를 살펴보면, 기본적으로 정한 A 조건의 오차(1.38%)와 비교할 때, C 조건 중 배플 두께가 10mm인 경우와 E 조건에서 배플의 1면을 거울면 처리 할 때 계통오차가 작아짐을 알 수 있다.

3.3 적분구 내부와 포트면의 물성 차이

절대 반사율 측정 장치에서는 기본적으로 입사광 및 2개의 관찰 포트들에 대하여 반사율을 0으로 가정한 다. 하지만 실제 적분구의 경우 외곽을 구성하는 구곽(주로 알루미늄 또는 섬유 강화 플라스틱 등으로 구성)과 내부 코팅(BaSO₄)된 물질이 상이하며, 이로 인한 포트 면에서의 반사율이 존재하게 된다. 이런 경우를 표 4와 같은 경우로 구분하여 오차 발생 정도를 확인하였다.

표 4. 포트 표면 및 적분구 내부 물질
Table 4. Materials of port and wall

	Material	Reflectance	Error (%)
Integrating Sphere wall	BaSO ₄	0.95 (Lambertian)	-
Port surface	Carbon	0 (Absorbed)	1.38
	BaSO ₄	0.95 (Lambertian)	1.12
	Aluminum	0.95 (Specular)	0.77

표 4의 결과를 살펴보면 적분구상에 존재하는 포트들에 의한 반사 특성을 0으로 가정한 경우, 쉽게 예상할 수 있는 바와 같이 실제 샘플의 반사율 값이 가장 큰 차이를 나타냈으며, 포트 특성을 적분구 내부와 동일한 물질로 설정할 경우보다 오히려 거울면 반사 특성을 갖도록 설정하였을 때 편차가 줄어드는 경향을 보였다.

3.4 절대 반사율 측정 장치의 최적화

다양한 오차 유발 인자들이 독립적으로 오차를 발생시키지 않고 상호 종속적인 관계를 형성하기 때문에 최적화를 시도하는 것이 쉽지 않다. 하지만 개별적인 요인들 중 영향이 큰 인자들을 순차적으로 나열한 후

최적의 조합 특성을 가질 것으로 예측되는 후보군을 표 5에서와 같이 선정하였다

표 5. 최적화된 모델
Table 5. Optimized model

	Port surface	Baffle	Error (%)
#1	Specular	<ul style="list-style-type: none"> · $\Phi = 29$ · $t = 1$ · $P = 0$ · $r =$ Lambertian 	1.01
#2	Specular	<ul style="list-style-type: none"> · $\Phi = 29$ · $t = 10$ · $P = +5$ · $r =$ Specular (1st surface) 	1.07
#3	Specular	<ul style="list-style-type: none"> · $\Phi = 29$ · $t = 5$ · $P = +5$ · $r =$ Specular (1st surface) 	0.50

표 5의 조건은 3.2~3.3절의 내용을 바탕으로 모두 적분구 내부와 다른 거울면 반사 특성을 갖는 포트들로 구성하였으며, 특히 #2와 #3의 경우 최초 샘플로 직접 입사되는 빛을 차단하는 역할을 하는 배플의 첫 번째 면을 거울면 처리를 하였다. 이에 따른 오차 발생 정도는 표 3의 A 조건의 오차(1.38%)에 비해 최대 모든 조건에서 작은 값을 보였다. 특히 포트와 배플 1면을 모두 거울면 처리를 할 경우 0.5%까지 오차를 줄일 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

광학적 특성 예측을 위해 주로 사용되는 몬테 카를로 기법을 적용한 순 방향 광선 추적 기법의 문제점으로 지적되어오던 연산 속도를 높이기 위해 고전적인 방식에서 사용되던 물체 검색에 사용되는 불필요한 중복 카운터, 물체를 만난 광선의 에너지 계산과 진행 방향을 결정하는 계산 부분에 대한 알고리즘 개선을 통해 정확도를 보장하면서도 연산 처리 속도를 향상

시켰다.

제안된 순 방향 방식의 광선 추적 알고리즘을 활용하여 Sharp-Little 방식의 적분구를 활용한 절대 반사율 측정 장치의 다양한 조건별 오차 발생 정도를 확인한 후, 오차 발생 정도에 따른 우선 순위를 적용하여 시스템의 최적화를 시도하여, 최적의 조건을 제시하였다. 이에 따르면 포트와 배플의 반사 특성이 절대 반사율 측정에 있어 상당한 오차를 발생시킴을 알 수 있으며, 전형적인 적분구와 달리 배플 등에 적용되는 반사 특성이 Lambertian 보다 Specular 특성을 가질 경우, 오히려 좋아짐을 확인하였다.

본 논문에서는 적분구 내벽의 반사 특성을 모두 이상적인 Lambertian 특성만을 부여하고, 각종 포트 및 배플의 특성을 일부 변경하였으나, 보다 사실적인 연구를 위해서는 적분구 내벽의 반사 특성 역시 이등방 반사 분포 함수(Bidirectional reflectance distribution function)를 고려하여야만 하며, 이에 대한 논의는 추가적으로 진행할 계획이다.

끝으로 본 논문에서 개발된 알고리즘은 적분구 방식의 반사율 측정 장치에만 적용되는 것이 아니라, 대량의 연산이 필요한 디스플레이 분야 및 흑체의 유효 복사율과 같은 각종 광학적 특성을 예측·평가하는데도 적용이 가능할 것으로 판단되어 향후 관련 분야에 대한 연구를 진행하는데 있어 매우 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

References

- [1] Chang Soon Kim, Measurements of the Absolute Diffuse Spectral Reflectance Factors Using a Multichannel Array Detector, (1997).
- [2] A.V. Prokhorov, "Monte Carlo method in optical radiometry" Metrologia, 465-471, (1998).
- [3] Leonard Hanssen, "Integrating-sphere system and method for absolute measurement of transmittance, reflectance, and absorptance of specular samples" Applied Optics, Vol. 40, 3832-3842 (2001).
- [4] Leonard M. Hanssen, Keith A. Snail, "Integrating spheres for Mid- and Near-infrared Reflection Spectroscopy" John Wiley & Sons Ltd, Chichester, (2002).
- [5] Alexander V. Prokhorov, Sergey N. Mekhontsev, Leonard M. Hanssen "Monte Carlo modeling of an integrating sphere reflectometer" Applied Optics, Vol. 42, 3832-3842 (2003).
- [6] Kevin Suffern, "Ray Tracing from the Ground Up" A K


연산 속도가 개선된 몬테카를로 광선 추적 알고리즘 개발 및 이를 활용한 절대 반사율 측정 장치 특성 분석에 관한 연구

- Peters, Ltd. (2007).
[7] <http://optics.synopsys.com>
[8] INSIDEOPTICS CO., "RAYMZ User Manual 2014"
<http://www.insideoptics.com>.
[9] Casimer DeCusatis, "Handbook of Applied Photometry"
AIP Press, (1998).
[10] Seongchong Park, "Correction of self-screening effect in
integrating sphere-based measurement of total luminous
flux of large-area surface-emitting light sources" Applied
Optics, Vol. 49, 3831-3840 (2010).
[11] Seongchong Park, Dong-Hoon Lee, Seung-Nam Park,
"Six-port integrating sphere photometer with uniform
spatial response" Applied Optics, Vol. 50, 3832-3842
(2011).



변석주(邊錫柱)

1973년 10월 10일생. 2012년 서강대학교
물리학과 졸업(박사). 현재 (주)인사이드
옵틱스 대표.



전민용(全敏鎔)

1967년 2월 9일생. 1994년 한국과학기술원
물리학과 졸업(박사). 현재 충남대학교
물리학과 교수.

◇ 저자소개 ◇



김한필(金漢必)

1975년 12월 2일생. 2004년 전남대학교
물리학과 졸업(석사). 2012년 충남대학교
물리학과 박사수료. 현재 한국광기술원
선임연구원.



박중식(朴鍾植)

1973년 2월 15일생. 2002년 전남대학교
물리학과 졸업(석사). 현재 (주)씨엘에프
하이텍 대표이사.