

논문 2006-43SP-6-6

물리적 특성 모델링에 기반한 라이팅 환경의 렌더링 기법

(Rendering Method of Light Environment Based on Modeling of Physical Characteristic)

이명영*, 이철희**, 하영호***

(Myong-Young Lee, Cheol-Hee Lee, and Yeong-Ho Ha)

요약

본 논문에서는 라이팅 환경을 구성하고 있는 광원과 물체의 광학적인 특성을 모델링하여 특정 위치의 관찰자의 시야에 들어오는 3차원 영상을 추정하는 알고리즘을 제안한다. 이전의 논문에서 제안했던 기법을 개선하고, 실제의 자동차 리어램프를 실험에 적용하여 추정된 빛자극과 측정된 빛자극을 비교하여 검증하였다. 렌더링 알고리즘으로는 컴퓨터 그래픽에서 많이 사용되고 있는 광선추적기법을 이용하고, 정확한 실사영상(realistic image)을 재현하기 위하여 물체의 물리적 특성을 반영하는 분광분포를 고려하였다. 물체의 빛 표면반사 및 투과특성과 광원의 빛방출 기하특성을 모델링하여 시점으로 들어오는 빛에너지 추정의 정확도를 개선하였다. 또한 추정된 빛에너지를 인간시각이 느끼는 동일한 색자극으로 디스플레이에 표시할 수 있도록 모니터특성화기법을 적용하여 실사영상에 근접한 영상을 재현하였다.

Abstract

In this paper, we propose an improved reproduction algorithm for a realistic image of the real scene based on the optical characteristics of the light sources and the materials at the lighting environment. This paper is continuation of the previous study to improve the modeling method of the light sources and the materials and apply this to the real rear lamp of automobile. The backward ray tracing method is first used to trace the light ray from a light source, and also considers the physical characteristics of object surfaces and geometric properties of light radiation to estimate accurately the light energy incoming toward to human eyes. For experiments and verification of the proposed method, the simulation results are compared with the measured light stimuli. Accordingly, the simulation results show that the proposed algorithm can estimate light energy well and reproduce the visually similar image with a scene incident on a sight of viewer.

Keywords : realistic image, ray tracing, spectral distribution, shading model, BRDF.

I. 서론

자동차 및 건축물의 가상경험, 그리고 항공 시뮬레이션 등과 같은 시제품 개발에 앞선 가상의 3차원 체험기

술에 대한 연구가 더욱 활발히 진행되고 있고, 3차원 컴퓨터 그래픽스 기술의 발달로 가상환경(virtual environment)을 렌더링하는 많은 기법들이 알려져 있다. 여기에는 시각조건에 맞는 가상 환경의 3차원 형상 모델링과 빛의 방향이나 세기 등을 고려한 사실감 있는 질감구성의 두 가지 단계로 나누어질 수 있는데, 질감 구성을 위한 렌더링의 방법에는 크게 영상 기반 방법(image-based method)과 물리 기반 방법(physical-based method)으로 구별된다^[2,3]. 영상기반 방법은 구성하기 용이하나 많은 데이터량과 정확한 사실성을 반영하지 못하는 단점이 있다^[4]. 이에 비해 물리 기반 방법은 광원과 물체, 또는 물체와 물체 사이에서 일어나는

* 학생회원, *** 평생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

** 정회원, 안동대학교 컴퓨터공학전공 (Major of Computer Engineering, Andong National University)

※ 본 논문은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

접수일자: 2006년2월27일, 수정완료일: 2006년8월3일

빛의 전송을 기하학적으로 모델링함으로써 사실감 있는 영상의 생성에 많이 이용되어 왔다. 특히, 자동차의 램프 설계나 건축물의 3차원 렌더링을 위한 라이팅 시뮬레이션은 인간의 시야로 들어오는 색자극을 정확하게 추정할 수 있는 보다 효율적인 모델링이 요구된다. 이러한 3차원 환경의 사실감 있는 영상을 렌더링하기 위해서 광선추적기법(ray tracing method) 기술이 많이 사용되고 있다. 광선추적기법은 일정한 스크린을 통해 관찰자의 눈에 들어오는 모든 빛을 찾아내고, 여러 방향에서 들어오는 광선들의 색을 추정하여 영상을 생성하는 기법이다. 광선추적기법은 빛의 경로를 추적한다는 점에서 거울이나 투명한 물체 등을 더욱 현실감 있게 표현할 수 있는 강력한 렌더링 기법이다.

본 논문은 이전에 제안한 알고리즘^[1]을 모델링 부분에서 개선하고 검증하였으며, 라이팅 환경의 정확한 시뮬레이션을 위한 물리적 특성화에 기반한 렌더링 기법을 제안한다. 먼저, 관찰자의 시야에 들어오는 빛의 자극을 더욱 정확하게 재현하기 위해 분광에너지 기반의 광선추적기법을 제안하고 추적된 빛에너지의 색자극을 정확하게 디스플레이하기 위하여 사용된 모니터의 디스플레이 특성화과정을 수행하였다. 아울러 광선추적기법을 이용한 정확한 빛에너지의 추적을 위해 광원과 3차원 환경에서의 물체의 특성을 물리적인 분광특성에 기반하여 모델링하였다. 본 연구에서는 실험과 검증을 위하여 실제의 자동차 리어 램프(rear lamp)의 점등실사영상을 렌더링하였는데, 광원으로 사용된 필라멘트 전구에 대해서는, 전구의 전체광속과 분광전력분포를 측정하여 분광정보기반의 음영모델에 사용하였고, 특별히 전구는 바라보는 위치에 따라 광도값이 다르게 관찰되므로 이러한 기하특성을 모델링하기 위하여 측정기반의 RAYSET 데이터를 사용함으로써 특정위치에서의 광도값 추정을 더욱 정확하게 하였다. 또한 물체에 대해서는, 음영모델에 사용될 반사와 투과 특성을 반영하는 파라미터를 추정하기 위해 BRDF 데이터를 이용한 피팅함수(fitting function)를 구하여 정확한 음영모델이 적용될 수 있도록 하였다. 또한 빛에너지의 추적을 위해 사용된 메쉬형태의 3차원 물체에 대하여 추적과정에서 실사영상의 현실감을 증대시키고 속도의 향상을 위해 3차원 복셀화(voxelization) 기법, 메쉬 법선 보간(mesh normal interpolation) 기법, 그리고 글래어 효과(glare effect)처리 등을 구현하여 시뮬레이션의 성능을 향상시키고, 실제의 시뮬레이션 모델링에 적용될 수 있도록 구현하였다.

본 논문에서는 검증을 위하여 실제의 자동차 리어 램프에서의 광원과 3차원 기하모델을 제안한 방법에 따라 모델링하여 실험하였고, 위치별 물리적 색자극을 비교하고 결과영상을 관찰실험을 통해 확인함으로써 실제의 인지영상과 유사한 실사영상을 재현하였다.

II. 분광특성 기반의 역방향 광선추적기법

1. 역방향 광선추적기법(backward ray tracing)

광선추적기법은 광원에서 출발한 광선이 물체에 닿아 반사, 산란, 투과되는 현상을 모델링하여 최종적으로 관찰자의 눈에 들어오는 빛을 찾는 기법이다. Arbo^[7]와 Whitted^[8]에 의해 제안된 역방향 추적기법은 관찰시점이 되는 인간의 눈에서 시공간(viewing space)이 되는 스크린으로 이어지는 광선의 경로를 하나하나 추적하여 눈에 들어오는 빛만을 찾아내는 방법이다. 즉, 관찰자의 시선방향을 따라가서 빛을 발산하는 물체를 찾아내는 역방향 추적기법으로써, 미리 정해진 개수만큼의 광선을 추적하므로 모든 광선을 추적하는 정방향 추적기법에 비해 계산량을 줄일 수 있는 효율적인 방법이다.

이러한 역방향 광선추적기법은 기존의 와이어프레임 렌더링이나 은면제거 알고리즘(hidden surface removal)이 필요하지 않고, 경면반사(specular reflection)나 경면굴절(specular refraction)이 일어나는 금속이나 거울, 또는 유리물체에 대한 매우 사실적인 영상을 생성할 수 있다는 장점이 있다. 그림 1에서 이와 같은 역방향광선추적기법의 개념을 나타내고 있다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, 시점(eye point)을 출발한 광선은 컴퓨터의 스크린으로 설정되는 시공간을 따라 픽셀단위로 진행하면서 물체와의 교차점을 찾고, 다음 진행방향을 계산하면서 광원으로부터 오는 빛을 강도를 계산하는 과정을 받

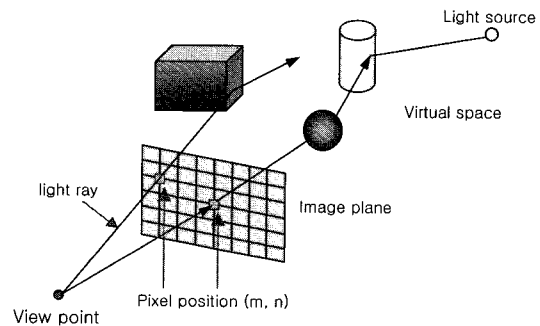


그림 1. 역방향 광선추적기법의 개념도
Fig. 1. The concept of backward ray tracing.

복한다. 만약 시점을 출발한 임의의 광선이 어떠한 물체와도 교차점이 존재하지 않으면, 그 픽셀은 미리 정한 배경색으로 칠해지게 된다.

2. 분광특성 기반의 스펙트럼 에너지 추정

본 논문에서는 인간의 시야로 입사하는 빛에너지의 물리적인 양을 추정하기 위해서 3차원 환경에서의 빛의 물리적인 분광에너지와 물체의 분광반사율 및 분광투과율을 사용하였다. 광선추적기법을 사용하여 특정 시야각으로 입사하는 빛에너지를 분광특성 기반으로 추정하는 전체적인 과정을 그림 2에 도식화하였다. 시점을 출발한 광선이 3차원 공간상의 물체와 교차하게 되면 그 지점에서 광원의 분광에너지와 물체의 분광특성으로 시점에 기여하게 되는 에너지 분포를 계산하게 되고 그 절대량은 시점방향의 벡터, 광원방향의 벡터, 그리고 교차점의 법선벡터 사이의 기하학적 관계로 계산된다. 이러한 반사와 투과의 반복연산 중에 더 이상 교차점이 존재하지 않으면 그 때까지의 분광에너지의 합으로 삼자극치(tri-stimulus value)를 계산하고, 특정 디스플레이 장치에 영상으로 재현하기 위해 디스플레이 RGB 값으로 변환하게 된다.

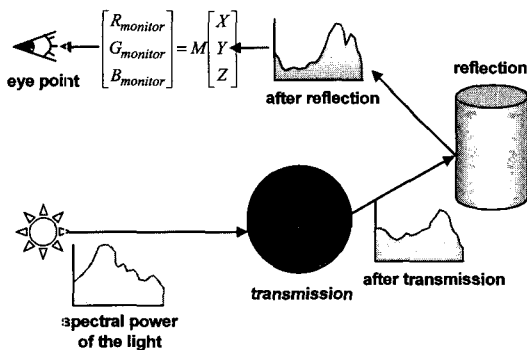


그림 2. 광원과 물체의 분광특성에 기반한 색의 계산
Fig. 2. Calculation of color based on spectral characteristics of light sources and object.

3. 분광특성기반의 음영모델

광선추적기법에서는 진행하던 빛이 가상의 3차원 공간상에 있는 물체에 닿아서 교점이 발생했을 때 음영모델(shading model)을 적용하여 그 지점에서의 빛기여도를 계산하게 된다^[6]. 음영모델은 광선추적을 통하여 빛에너지를 추정함에 있어서 그 정확도 및 영상의 현실감을 좌우하게 되므로, 본 논문에서는 실세계에서 일어나는 물리적인 특성을 더욱 정확하게 고려하기 위하여 음영모델을 광원과 물체의 분광분포특성을 고려한 파장의

함수로 확장하였다. 광선의 진행과정에서 물체와 만나는 교점이 발생하면, 다음의 식 1과 2에서와 같은 전역 음영모델(global shading model)과 국부음영모델(local shading model)이 적용된다^[6].

$$I(P) = I_{local}(P) + I_{global}(P) = I_{local}(P) + k_{rg}I(P_r) + k_{tg}I(P_t) \quad (1)$$

$$I_{local}(P) = I(\lambda)F(\lambda)k_d(L \cdot N)^n + I(\lambda)F(\lambda)k_s(R \cdot V)^{n'} + k_aI(\lambda)F(\lambda) \quad (2)$$

여기서 $I(P)$, $I(\lambda)$, $F(\lambda)$, 그리고 k 는 각각 교점 P에서 시점으로 기여하는 분광에너지, i번째 광원의 분광에너지, 교점이 일어난 물체의 분광투과율 및 분광반사율, 그리고 물체의 투과율 및 반사율을 나타낸다. $(L \cdot N)$ 와 $(R \cdot V)$ 는 각각 광원과 교차면 법선벡터와 내적, 반사광과 시점벡터의 내적을 나타내고, n 과 n' 은 확산 및 경면 표면의 하이라이트 계수, k_{rg} 와 k_{tg} 는 반사광과 투과광의 다음 교차점 P_r, P_t 를 위한 전역적인 반사 및 투과율을 나타낸다.

III. 물리적특성에 기반한 3차원 라이팅환경의 모델링

1. 3차원 메쉬형상과 3D 복셀화

광선추적기법에서는 시선을 추적하므로, 모든 물체는 3차원 실좌표계(world coordinate)로 표시되는 가상의 공간상에서 설정되고, 이후의 모든 계산은 3차원 벡터에 의해 이루어진다. 본 논문에서는 실험 및 검증을 위해 실제의 자동차 리어 콤비네이션 램프의 점등모델을 사용하였는데, 리어 콤비네이션 램프는 크게 광원부분인 벌브(bulb), 옵틱(optic)기능을 위한 반사경, 그리고 전방의 렌즈부분으로 나뉜다. 렌더링 시뮬레이션을 위해, 먼저 CAD 툴을 사용하여 이들 모델에 대하여 3차원 공간에서의 메쉬형상화를 구현하였다. 메쉬의 크기는 형상의 복잡도와 연산시간을 고려하여 적응적으로 결정되었는데, 본 논문의 실험에서는 반사경에 대해서는 1.2mm, 렌즈에 대해서는 2mm로 결정하였다. 또한 이러한 메쉬크기로 모델을 생성할 경우, 전체 리어 콤비네이션 램프모델에 대해 약 30만 ~ 40만개의 메쉬가 생성되어 시뮬레이션 과정에서 광선이 교차한 물체를

찾기 위한 연산시간이 오래 걸리는 문제가 있다. 따라서 본 논문에서는 리어 콤비네이션 램프모델이 설정된 3차원 공간을 가상의 서브공간(subspace)으로 나누어 교차점 탐색시 모든 메쉬를 검사하지 않고 광선이 지나가는 서브공간, 즉 복셀 내부의 메쉬만을 검사하도록 하여 효율적인 탐색이 되도록 구현하였다.

2. BRDF/BTDF 에 기반한 하이라이트계수의 추정
물리적 특성에 기반한 렌더링 알고리즘을 구현함에 있어서 광원과 물체의 분광에너지특성과 함께 물체의 표면 반사 및 투과특성을 모델링하는 과정 역시 매우 중요하다. 식 2의 음영모델에서 나타낸 물체표면의 하이라이트 계수 n' 는 물체의 하이라이트 강도를 나타내며 물체의 경면성질 및 질감을 결정짓는 파라미터이다

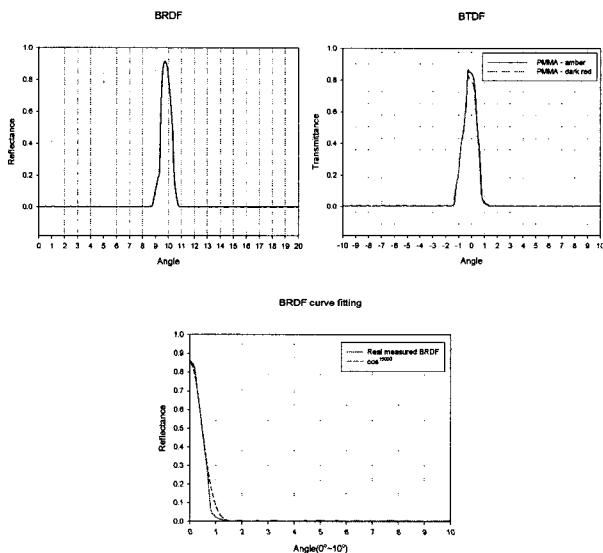


그림 3. 측정을 통해 형성된 BRDF 및 BTDF 곡선과 BRDF의 피팅 곡선 (a) 반사경의 BRDF (b) 렌즈의 BTDF (c) BRDF를 위한 $\cos^{1500}\alpha$ 피팅 곡선

Fig. 3. Real measured BRDF and BTDF curves for materials, and fitting curve (a) BRDF for reflector (b) BTDF for lens (c) $\cos^{1500}\alpha$ fitting curve for BRDF.

표 1. BRDF/BTDF 측정 시트
Table 1. BRDF/BTDF measurement sheet.

| Measured material | | Measurement condition |
|-------------------|------------------|----------------------------------|
| Reflector | Aluminum coating | BRDF(incident angle - 10 degree) |
| | PMMA(amber) | BTDF(incident angle - 0 degree) |
| PMMA(red) | | |

[8]. 본 논문에서는 일반적으로 경험 또는 통계적 데이터로서 n' 를 결정하는 기존의 방법과는 달리, 실제 물체의 반사 및 투과 데이터를 각도별로 측정하고 수학적으로 모델링하여 n' 값을 추정하였다. 즉, 수학적 모델링의 재료로서 특정 입사각에 대한 전 방향에 걸친 물체의 반사 또는 투과율을 데이터화한 BRDF 및 BTDF^[9]를 피팅함수(fitting function)을 사용하여 n' 를 추정하였다. 그림 3에서는 본 논문의 실험에서 사용된 리어 콤비네이션 램프의 반사결과 렌즈의 측정된 BTDF 곡선 및 BRDF를 피팅한 함수곡선을 보여주고 있고, 표 1에서 그 종류를 보여주고 있다.

3. 표면 스무딩을 위한 메쉬보간

메쉬보간기법은 렌더링의 결과영상에서 볼 수 있는 메쉬윤곽의 불연속적인 테두리를 제거하기 위한 스무딩 기법이다. 이러한 메쉬형태의 표면을 보간하기 위한 가장 쉽고 효과적인 기법으로 구로쉐이딩(Gouraud shading) 알고리즘이 사용되고 있다. 이 기법은 삼각메쉬의 각 정점에서의 밝기값으로 메쉬내부의 모든 픽셀값을 보간한다. 구로쉐이딩기법은 구현이 쉽고 전체적으로 만족할 만한 스무딩결과를 얻을 수 있지만 하이라이트 영역(highlight area)을 약하게 하거나 스팟라이트 효과(spot light effect)를 잃어버릴 수 있는 단점이 있다. 또 다른 보간기법으로 널리 알려진 알고리즘으로는 풍쉐이딩(phong shading)이 있다. 풍쉐이딩기법은 메쉬의 각 정점의 법선들을 선형적으로 보간하는데, 각 정점의 법선은 정점을 이웃하는 면들의 법선을 평균하여 정해진 다. 풍쉐이딩은 만족할만한 스무딩 결과와 하이라이트 영역이나 디테일(detail)의 소실이 없는 좋은 결과를 얻을 수 있는 반면에, 연산시간이 늘어나서 영상의 전체적인 렌더링 시간에 큰 영향을 주는 단점이 있다.

본 논문에서는 연산시간을 최소로 하면서 우수한 보간결과를 얻기 위하여 파라메트릭 보간기법(parametric interpolation method)을 사용하였다. 파라메트릭 보간은 그림 4에서 볼 수 있듯이 각 정점의 법선벡터를 u, v 라는 무게중심 파라메터를 사용하여 현재지점의 새로운 법선을 계산하는 기법이다. 본 논문의 알고리즘에서는 각 정점에 대한 법선벡터를 메쉬데이터 로딩시 계산하여 렌더링 연산에서의 연산부담을 제거하였으며, uv 파라메터는 광선과 메쉬의 교차점 탐색을 위해 사용된 Tomas Moller의 알고리즘^[10]에서 구한 정보를 그대로 사용함으로써 별도의 연산과정을 제거하여 전체적인 연

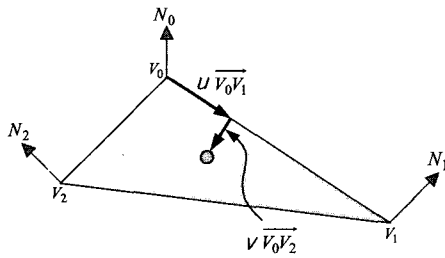


그림 4. 교차점에 대한 메쉬 내 uv 파라미터
Fig. 4. uv parameters in a mesh at a intersection.

산속도를 향상시켰다. 교차점에서의 새로운 법선은 uv 파라미터를 사용하여 다음의 식 3을 통해 구해진다.

$$N_p = (1 - (u + v))N_0 + uN_1 + vN_2 \quad (3)$$

파라메트릭 보간기법을 사용한 보간결과를 그림 5에서 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있듯이, 메쉬보간처리를 수행한 후의 결과 영상이 보간처리 전의 결과에 비해 매우 부드러워지고 하이라이트 영역이 잘 보존되어진 것을 볼 수 있다.

IV. 스펙트럼 에너지의 모니터 RGB 변환

모든 색은 각각 고유의 분광에너지 분포를 가지고 있고, 분광에너지정보로서 장치 독립적인(device independent) 색 공간으로 변환하여 정확한 색의 정의가 가능하게 된다^[11].

또한, 이러한 물체의 고유색을 디스플레이 장치에 정확히 재현하기 위해서는 현재의 장치에 맞는 변환행렬

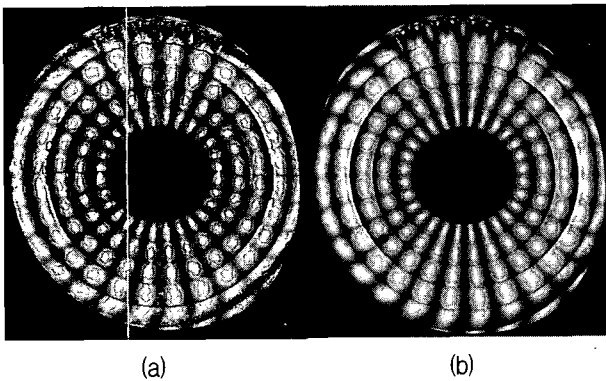


그림 5. 리어램프의 반사경에 대한 보간 결과 (a) 메쉬 보간처리 하기전 랜더링 영상 (b) 파라메트릭 보간기법을 적용한 랜더링 영상

Fig. 5. Interpolation results for reflector of rear lamp (a) rendered image with no interpolation (b) rendered image with interpolation.

을 통해 RGB 값으로 변환하는 과정을 거쳐야 한다. 본 논문에서는 최종적인 픽셀의 색을 계산하기 위하여 이러한 디스플레이 장치의 특성을 고려하였다. 따라서 광원에서 출발한 빛에너지의 분광분포가 반사와 투과를 반복하면서 물체의 반사와 투과특성에 따라 변형의 과정을 거쳐서 최종적으로 눈에 도달하는 빛에너지 R_λ 는 다음 식을 통해 물체의 고유색을 대표하는 XYZ 삼자극치로 변환된다^[11].

$$\begin{aligned} X &= \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{x}(\lambda)\Delta\lambda \\ Y &= \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{y}(\lambda)\Delta\lambda \\ Z &= \sum_{\lambda=380}^{780} S(\lambda)R(\lambda)\bar{z}(\lambda)\Delta\lambda \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $S(\lambda)$ 와 $R(\lambda)$ 는 각각 광원의 스펙트럼에너지분포와 물체의 분광반사율을 나타낸다. $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda)$ 그리고 $\bar{z}(\lambda)$ 는 각각 CIEXYZ 표준등색함수(color matching function)를 나타낸다^[11]. 위 식 4에서 $S(\lambda)R(\lambda)$ 는 광선추적과정에서 최종적으로 도출되어 시야로 들어오는 분광에너지분포로 표현할 수 있으므로 삼자극치 XYZ는 절대량이 된다. 특정한 디스플레이 장치에서 이 결과를 표현하기 위해서는 XYZ값을 디스플레이 RGB값으로 변환해야 하는데, 이러한 관계를 모델링하는 과정을 특성화(characterization)라 한다^[12,13]. 따라서 목적하는 XYZ 삼자극치를 동일한 색자극으로 표현하기 위해서는 먼저 디스플레이 장치의 특성화 수행이 요구된다. 본 논문에서는 CRT 장치를 특성화하기 위한 방법으로 CRT의 전기-빛 입출력 곡선의 지수적인 특징을 모델링한 GOG 모델^[12]을 사용하였다. 먼저, GOG 모델은 입력 디지털 값과 출력되는 영상의 휘도값(luminance)을 각 red, green, blue 채널별로 다음의 식 5와 같이 모델링 한다.

$$\begin{aligned} R &= [k_{g,r} \{d_r / (2^n - 1)\} + k_{o,r}]^{y_r} \\ G &= [k_{g,g} \{d_g / (2^n - 1)\} + k_{o,g}]^{y_g} \\ B &= [k_{g,b} \{d_b / (2^n - 1)\} + k_{o,b}]^{y_b} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 $k_{g,r}, k_{g,g}, k_{g,b}$ 는 RGB 각 채널에 대한 CRT의 이득(gain)을 나타내고, n 은 디스플레이 장치의 입력 디지털 값의 bit 수를 나타낸다. 또한 $k_{o,r}, k_{o,g},$

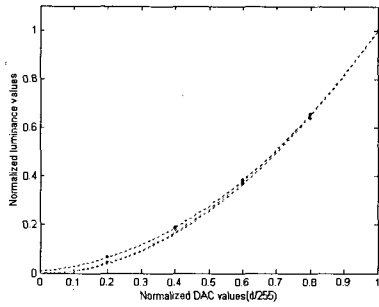


그림 6. 각 채널별 디지털값에 대한 휘도값과 최적화 알고리즘으로 예측된 피팅곡선
 Fig. 6. Actual values for monitor data and its estimated fitting curve for each channel

$k_{o,b}$ 는 디스플레이 장치의 각 채널에 대한 오프셋(offset)을, r_r, r_g, r_b 그리고 d_r, d_g, d_b 는 각각 각 채널에 대한 비디오전압과 빔전류 간의 비선형지수관계와 디지털 입력값을 나타낸다. 최적의 파라미터 k_g (gain), k_o (offset), γ (gamma) 값을 구하기 위해 RGB 채널별로 등간격의 디지털 값으로 5개의 패치를 만들고, 각각의 휘도를 측정하여 입력 디지털 값과 그에 따른 휘도값의 측정치를 위의 식 5에 대입한다. 최적화 알고리즘을 사용하여 가장 최적화된 파라미터 k_g, k_o, γ 값을 계산함으로써 전기-빛 입출력 곡선을 모델링하고 정규화된 휘도값을 추정한다. 채널별로 추정한 정규화된 휘도값을 다음의 식 6과 같은 행렬연산을 이용해 CIEXYZ값으로 변환한다.

$$\begin{bmatrix} X_{pixel} \\ Y_{pixel} \\ Z_{pixel} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (6)$$

본 논문에서 사용된 디스플레이 장치는 EIZO Flexscan T766 모델 CRT 모니터를 사용하였다. 상기의 방법과 같이 RGB 채널별로 5개의 패치를 측정하여 휘도값을 구하고 이를 이용하여 전기-빛 입출력 곡선을 모델링하여 그림 6에 나타내었다. 표 2는 GOG 모델링 기법을 사용하여 산출된 세 개의 디스플레이 파라미터를 나타내고 있다.

또한, XYZtoRGB 변환행렬을 산출하기 위해 상기의 식 6의 역행렬을 구하여 다음의 식 7에 나타내었다.

$$\begin{bmatrix} R_{monitor} \\ G_{monitor} \\ B_{monitor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0304 & -0.0129 & -0.0048 \\ -0.0097 & 0.0178 & 0.0004 \\ 0.0005 & -0.0017 & 0.0077 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{input} - X_B \\ Y_{input} - Y_B \\ Z_{input} - Z_B \end{bmatrix} \quad (7)$$

표 2. GOG 모델링에 의해 산출된 세 개의 디스플레이 파라미터

Table 2. The Three System Parameters Estimated by Optimization Program.

| | k_g | k_o | gamma |
|-------|--------|---------|--------|
| Red | 1.0204 | -0.0204 | 1.9095 |
| Green | 1.0220 | -0.0220 | 1.8642 |
| Blue | 0.8997 | 0.1003 | 2.1514 |

표 3. GOG 모델을 사용한 모니터 특성화의 오차

Table 3. Characterization error for the EIZO monitor using GOG model.

| | $\Delta E_{ab-average}$ | ΔE_{ab-max} |
|-------------|-------------------------|---------------------|
| 216 patches | 1.9592 | 5.3923 |

여기서 X_B, Y_B, Z_B 는 $d_r = d_g = d_b = 0$ 의 무입력 영상의 삼자극치이며, 본 논문의 실험에서는 $[X_B Y_B Z_B] = [0.41 \ 0.53 \ 0.37]$ 로 측정되었다. 최종적으로 다음의 식 8을 이용하여 입력 XYZ에 대응하는 출력 디지털 RGB값을 계산하였다.

$$\begin{aligned} d_r &= [(2^n - 1)/k_{g,r}](R^{1/\gamma_r} - k_{o,r}) \text{ if } 0 \leq R \leq 1 \\ d_g &= [(2^n - 1)/k_{g,g}](R^{1/\gamma_g} - k_{o,g}) \text{ if } 0 \leq G \leq 1 \\ d_b &= [(2^n - 1)/k_{g,b}](R^{1/\gamma_b} - k_{o,b}) \text{ if } 0 \leq B \leq 1 \end{aligned} \quad (8)$$

상기의 알고리즘을 이용하여 본 논문에서는 216개의 칼라패치에 대해 특성화성능을 검증하였다. 아래의 표 3에서는 216개의 패치의 추정치와 측정치간의 CIELAB 평균색차와 최대색차를 보여주고 있다. 일반적으로 $\Delta E_{ab} < 3$ 은 육안으로 차이를 식별하기 힘든 색차이므로 특성화성능은 만족할만한 결과임을 알 수 있다. 따라서 본 논문의 광선추적을 통하여 최종 추정된 빛에너지의 분광분포는 XYZ 색자극으로 변환되고 최종 GOG 모델에 의해 산출된 XYZtoRGB 변환행렬을 이용하여 출력 RGB 값으로 계산된다.

V. 측정기반의 RAYSET 데이터를 이용한 광원 모델링

자동차의 리어콤비네이션 램프의 점등실사영상을 광선추적기법을 통해 렌더링하기 위해서는 사용되는 광원에 대한 정확한 모델링이 필요하다. 그러나 리어램프에 사용되는 필라멘트형 전구광원에 대한 수학적 모델링이나 기하학적 모델링을 광선추적기법에 사용한 예는 거

의 없는 실정이다. 계산적 효율성을 위해 형광램프와 같은 균일한 광을 방출하는 광원의 모델링을 위해 사용되고 있는 몬테카를로 적분법(Monte Carlo integration)^[14]은 균일광방출광원에 대해서는 좋은 결과를 나타내지만 비균일성이 큰 필라멘트전구광원에 대해서는 적용하기 어려운 단점이 있다.

본 논문에서는 물리적으로 정확도를 향상시킨 시뮬레이션을 위해 측정을 통하여 획득되어진 RAYSET 데이터를 이용하여 필라멘트 광원의 모델링기법을 제안한다. RAYSET 데이터는 광원의 전방향에 대해 밝은 휘도 방향은 큰 확률로, 어두운 휘도 방향에 대해서는 작은 확률로 정해진 개수만큼 표본화한 데이터로서 광원의 공간적인 방사특성을 나타낸다. Radiant Imaging사의 ProSourceTM 프로그램 및 장비에 의해 측정되며 광선의 Geometry, Angular data, Luminance정보를 가진다. 각 정보의 간략한 설명은 다음과 같다.

Geometry : 이 정보는 표본화되는 광선의 시작위치를 나타내며 측정장비를 통해 가장 큰 세기를 가지는 3차원공간에서의 점좌표를 나타낸다.

Angular data : 이 정보는 광선이 방사하는 진행방향을 나타내며, 각 Geometry 지점에 출발하는 광선의 방향벡터이다.

Luminance : 이 정보는 각각의 광선이 가지는 휘도 정보, 즉 단위가 루멘[lm]이 되며, 광원의 전체 광속을 표본화샘플의 개수로 나눈 값이 된다.

RAYSET 데이터는 비균일한 방사특성을 가지고 형상이 일정하지 않은 광원에 대한 모델링에 매우 유용한 데이터이다. 그림 7은 실험에 사용된 PY21W 필라멘트 램프로부터 표본화된 100개의 RAYSET 3-D 데이터를 그림으로 보여주고 있다. 그림에서 흰색 선은 표본화된 점광원의 방향벡터(angular data)를 나타내고, 녹색 점들은 각 점광원의 시작점(Geometry)을 나타낸다.

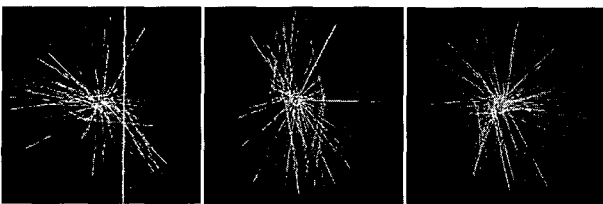


그림 7. PY21W 필라멘트 전구의 RAYSET 3차원 데이터

Fig. 7. 3-D plots of the sampled RAYSET data for PY21W filamentary lamp.

광선추적과정에서 물체와의 교차점이 발생하면 그 지점에서 시점방향으로 기여하는 빛에너지를 계산하게 되는데, 이 때 광원의 개수는 RAYSET 데이터에서 정의된 모든 샘플점광원들이 된다. 따라서 식 2의 국부조명모델은 다음의 식 9과 같이 모든 광원데이터에 대한 적분된 합으로서 빛에너지가 계산되도록 변경된다.

$$I_{local}(P) = \sum_{i=0}^{RAYSET_{total}} \{I_i(\lambda)(L \cdot Q)F(\lambda) (k_d(L \cdot N)^n + k_s(R \cdot V)^n)\} + k_a I(\lambda)F(\lambda) \quad (9)$$

여기서 Q 는 RAYSET 데이터에서 샘플점광원의 방향벡터를 나타내고, $I_i(\lambda)$, 즉 i 번째 샘플광원의 분광에너지분포는 다음의 과정으로부터 유도된다. 먼저, 샘플광원의 분광에너지분포는 다음의 식 10과 같이 정규화된 광원의 분광분포 $I_{i-norm}(\lambda)$ 와 미지의 가중치 w 의 곱으로 나타낼 수 있고, 이 결과를 다시 CIE 표준관찰자의 분광시감효율 $v(\lambda)$ 과 곱하여 계산된 결과가 RAYSET 데이터의 휘도(luminance, [lm]) 정보이므로 식 11에서와 같이 미지의 가중치 w 를 계산할 수 있다.

$$Lumens_{source} = K \times \sum_{\lambda=380}^{780} [w \times I_{i-norm}(\lambda)]v(\lambda)\Delta\lambda \quad (10)$$

$$w = \frac{Lumens_{source}}{K \times \sum_{\lambda=380}^{780} I_{i-norm}(\lambda)v(\lambda)\Delta\lambda} \quad (11)$$

다음의 식 12에서와 같이 식 11을 통해 구해진 w 와 $I_{i-norm}(\lambda)$ 의 곱은 RAYSET 데이터에서 특정휘도를 가지는 점광원의 실제 분광에너지 정보로 사용할 수 있다.

$$I_i(\lambda) = w \times I_{i-norm}(\lambda) \quad (12)$$

또한 분광에너지분포의 세기는 램버트(Lambert)의 코사인법칙에 따라 그 광원의 방향벡터 Q , 교차점과 광원위치를 이은 L 벡터간의 $\cos\theta$, $(L \cdot Q)$ 에 의해 조절된다. 본 논문의 실험에서는 RAYSET 데이터를 사용한 광원모델링의 결과를 평가하기 위해 RAYSET 데이터를 사용한 방법과 필라멘트 전구를 원통형 광원으로 근사화하여 몬테카를로 적분법을 사용한 방법을 시뮬레이션을 통해 비교하였다. 다음의 그림 8에서 결과영상을 보여주고 있다. 그림 8의 결과영상에서 볼 수 있듯이 반사경에 나타난 하이라이트 영역에서 광원의

디테일한 휘도패턴이 몬테카를로 방법을 사용한 방법의 영역보다 잘 나타나는 것을 알 수 있다.

VI. 렌더링 시뮬레이션

제안한 리어램프의 점등실사영상의 렌더링 알고리즘은 분광정보기반의 광선추적기법을 적용하여 구현되었다. 관찰자의 시야로 입사하는 화상정보를 물리적인 분광에너지의 형태로 추적하기 위해 광선추적에 필요한 모든 분광학적 및 광학적 파라미터들은 BRDF 데이터 및 분광방사측정기를 통해 정확하게 정의되었다. 시뮬레이션을 위한 파라미터들은 표 4에 정리하였다.

구현도구로는 마이크로소프트사의 Visual C++ 6.0을 사용하였고, 모두 네 개의 리어조합네이션 모델에 대하여 시뮬레이션을 하였다. 모든 제품은 현재 이용되고 있는 상업용 자동차에 적용되는 리어램프이며, 직접 생산하는 업체로부터 제공받아 본 실험에 이용하였다.

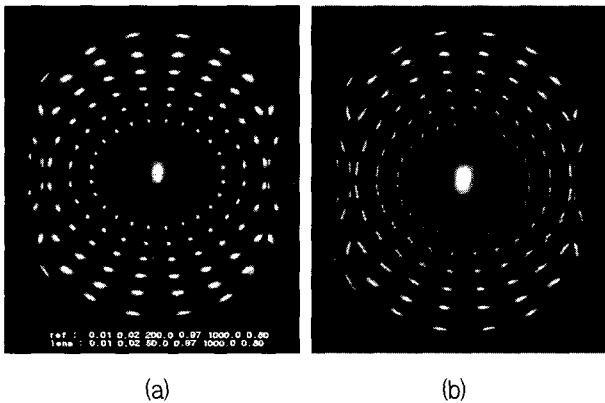


그림 8. 광원모델링기법에 따른 렌더링 결과영상 (a) 몬테카를로적분법 (b)RAYSET 데이터

Fig. 8. Images resulting from different light source modeling (a) Monte Carlo Integration (b) RAYSET data

표 4. 시뮬레이션을 위한 음영모델에 사용된 파라미터들

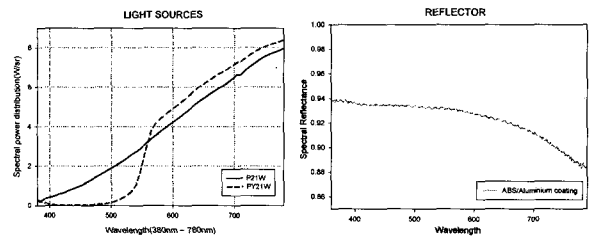
Table 4. The parameters used in shading model for the simulation.

| Parameters | Reflector | Lens |
|-------------------------------|-----------|-------|
| Transmittance, K_{tg} | 0.05 | 0.95 |
| Reflectance, K_{rg} | 0.95 | 0.05 |
| Diffuse coefficient, n | 10 | 50 |
| Specular coefficient, n' | 1,500 | 1,500 |
| Proportion of diffuse, K_d | 0.08 | 0.08 |
| Proportion of specular, K_s | 0.92 | 0.92 |

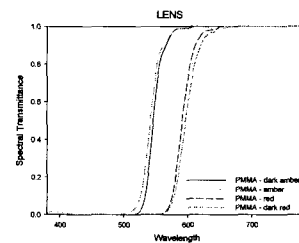
표 5에서 실험에 사용된 리어조합네이션램프의 리스트를 보여주고 있다. 상기의 광학적 특성과 램프모델과 함께 그림 9에서는 렌더링에 사용된 광원, 반사경, 렌즈의 분광특성을 나타내고 있다. 모든 분광정보는 380nm

표 5. 시뮬레이션에 사용된 리어조합네이션 램프 모델 Table 5. The rear combination lamp models used for simulations

| Model | Light source | Reflector |
|-------|---------------|-------------|
| 1 | P21W/5W | AL coating |
| | Viewing angle | Lens |
| | Front | PMMA(red) |
| 2 | P21W | AL coating |
| | Viewing angle | Lens |
| | Front | PMMA(red) |
| 3 | PY21W | AL coating |
| | Viewing angle | Lens |
| | Front | PMMA(amber) |
| 4 | PY21W/5W | AL coating |
| | Viewing angle | Lens |
| | Front | PMMA(red) |



(a) (b)



(c)

그림 9. 측정된 분광정보 (a) P21W와 PY21W 광원의 분광에너지특성 (b) 알루미늄코팅된 반사경의 분광반사율 (c) red와 amber 렌즈의 분광투과도

Fig. 9. Measured spectral characteristics (a) spectral power distribution of light source P21W and PY21W (b)spectral reflectance of the aluminum coated reflector (c) spectral transmittance of the red and amber lens.

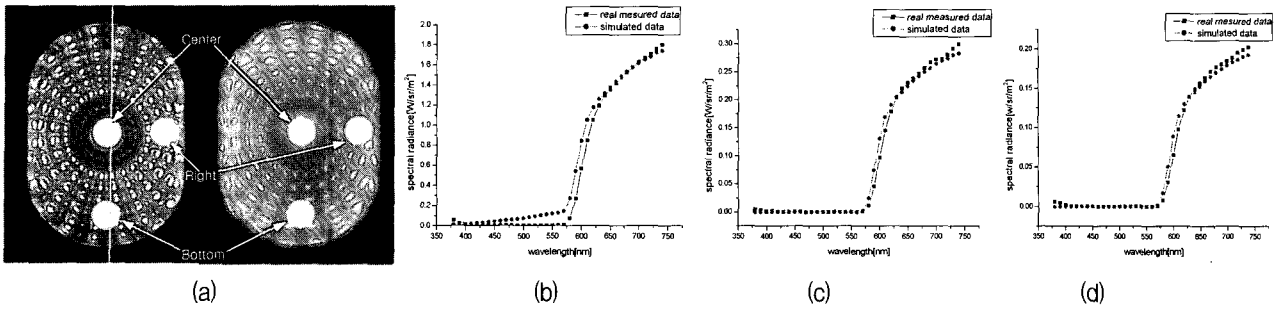


그림 10. 램프의 세 지점에 대한 측정과 렌더링결과의 분광에너지분포 (a) 분광에너지분포의 비교를 위한 촬영영상(왼쪽)과 렌더링영상(오른쪽)에서의 세 지점 (b) center 영역에 대한 분광에너지 비교 (c) right 영역에 대한 분광에너지 비교 (d) bottom 영역에 대한 분광에너지 비교

Fig. 10. Spectrum energy distributions of measured and rendered at the three local areas of rear lamp (a) the three local areas of captured(left) and rendered(right) image for spectral comparison (b) center area comparison (c) right area comparison (d) bottom area comparison

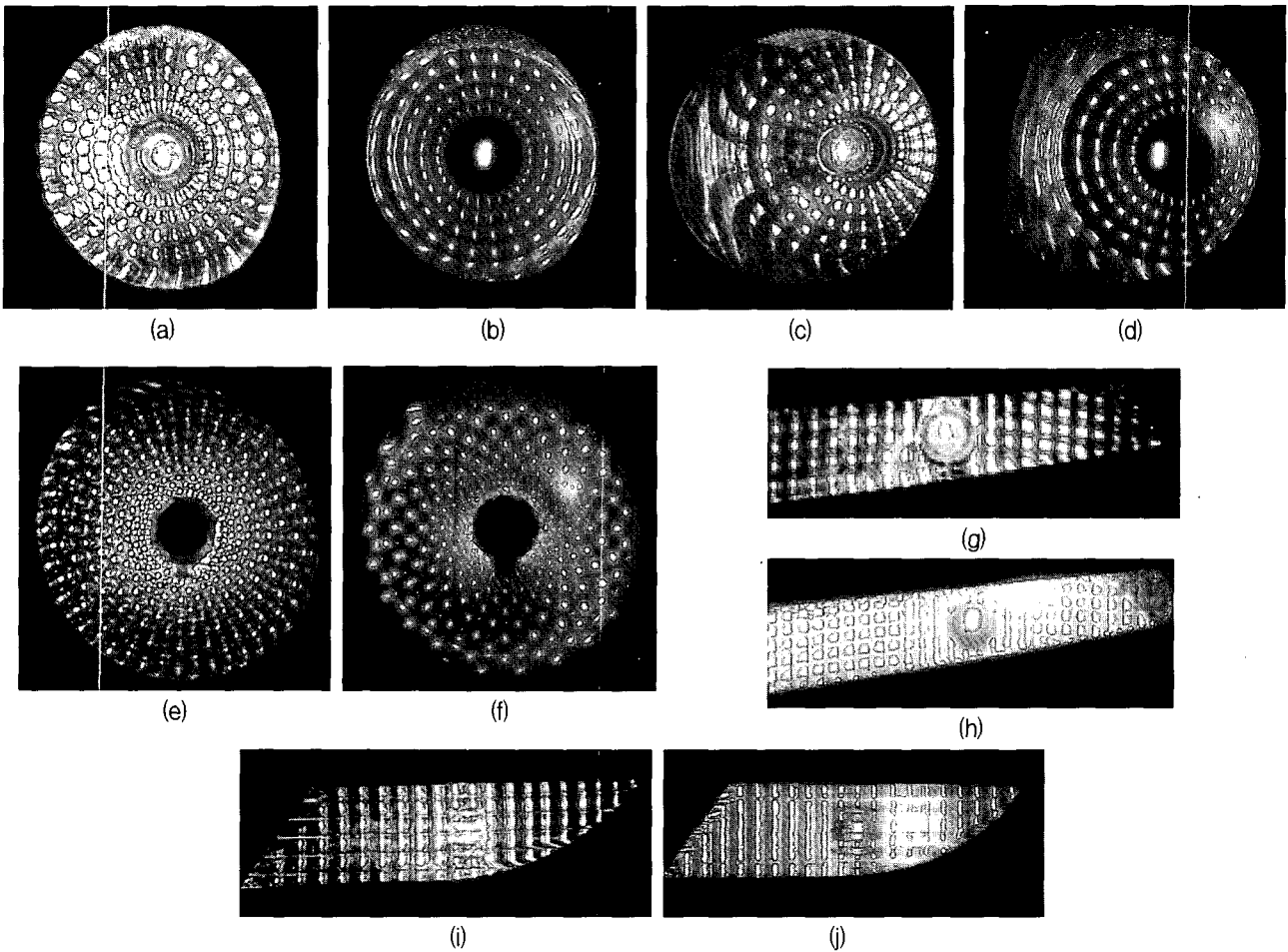


그림 11. 촬영된 영상들과 제안한 방법에 의해 렌더링된 영상들 (a),(b) 모델1에 대한 정면사진과 렌더링 결과영상 (c),(d) 15° 회전한 모델 1의 사진과 렌더링 결과영상 (e),(f) 모델 3 턴시그널 램프의 정면사진과 렌더링 결과영상(g),(h) 모델 4에 대한 정면사진과 렌더링 결과영상 (i),(j) 모델 4 턴시그널 램프의 정면사진과 렌더링 결과영상

Fig. 11. Real images captured by digital camera and rendered images by using the proposed method: (a), (b) front image of the tail lamp of model 1 and its rendered image (c), (d) 15 outboard image of the tail lamp of model 1 and its rendered image (e), (f) front image of the turn signal lamp of model 3 and its rendered image (g), (h) front image of the tail lamp of model 4 and its rendered image (i), (j) front image of the turn signal lamp of model 4 and its rendered image.

에서 780nm까지 5nm 간격으로 측정되었으며, 광원에 대해서는 CS-1000 분광방사휘도계, 반사경과 렌즈에 대해서는 CM3600-d 분광측색계가 사용되었다. 제안한물리적특성기반의 렌더링기법을 평가하기 위해 상기의 모델 특성을 적용한 렌더링 결과와 실제 램프의 점등상태에서 특정영역에 대한 분광에너지분포의 추정값과 측정값을 비교하였다. 본 논문의 평가에서는 표 5의 모델 2에 대해서 시뮬레이션하여 렌더링하고 그림 10에서와 같이 램프의 세 지점, 즉 center, right, bottom 의 하이라이트 영역을 선택하여 시뮬레이션 결과의 분광에너지분포특성과 실제 점등된 램프를 동일영역에 대하여 CS-1000 분광방사휘도계로 측정된 분광에너지분포특성을 비교하였다. 그림 10의 (a) (b) (c)에서 볼 수 있듯이, 시뮬레이션을 통하여 추정된 특정지점의 분광에너지분포가 실제의 측정된 분포와 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 따라서 제안한물리적특성기반의 광선추적기법이 효과적으로 인간의 시야로 들어오는 빛의 물리적 양을 잘 추적한다는 것을 알 수 있다. 제안한 기법을 적용하여 표5의 1, 3, 4 모델에 대해서 각각 시뮬레이션하여 그 결과영상을 그림 11에 나타내었다. 여기서 촬영된 영상과 렌더링된 영상의 색이 다소 차이가 나는 것은 카메라의 분광감도특성이 인간시각의 분광감도 특성이 다르고, 카메라의 휘도에 대한 인식가능한 동적범위(dynamic range)가 인간시각만큼 크지 않기 때문이다. 그림 11은 디지털 카메라에 의해서 획득된 램프의 실제사진과 제안한 방법에 의해 렌더링된 결과영상을 각각 보여주고 있다. 즉, 그림 11의 (a), (c), (e), (g), (i)는 촬영된 영상, (b), (d), (f), (h), (j)는 각각 렌더링된 영상을 나타낸다. 모든 결과영상들을 통해서 리어컴비네이션 램프의 광학적 패턴과 휘도패턴들이 실제와 매우 유사하고 세부 패턴들도 잘 추정되었음을 알 수 있다. 본 논문의 알고리즘에서는 결과영상의 현실감을 향상시키고 램프 개발자의 개발과정에서의 평가를 돕기 위한 후처리과정으로, 글레어 효과(glare effect)를 추가하여 렌더링 결과를 바탕으로 더욱 현실감있는 영상을 생성하였다.

VIII. 결 론

본 논문에서는 인간시각으로 인지하는 영상과 유사한 리어컴비네이션 램프의 실사영상을 재현하기 위한 물리적 특성기반의 역방향 광선추적기법을 제안하였다. 광원과 광학모델의 분광에너지분포, 분광반사 및 투과 특성을 음영모델에 사용하였으며, 필라멘트 전구형태의

비균일한 방사특성을 가지는 광원을 더욱 정확하게 모델링 하기 위해 측정기반의 RAYSET 데이터를 적용하여 개선된 음영모델을 제안하였다. 제안한 분광분포 기반의 광선추적기법은 기존의 단순한 RGB 기반의 렌더링 방법이 아닌 광원과 물체의 실제적인 물리적 특성을 고려하였으므로, 시제품의 개발에 앞선 가상의 모델실험을 위한 실사영상의 재현분야에 응용할 수 있는 모델링 알고리즘이다. 최종 추정된 분광에너지분포는 특정 모니터에서 정확한 색자극으로 재현하기 위해 모니터 특성화과정을 추가함으로써, 실제 인간시각으로 느끼는 동일한 색자극을 디스플레이할 수 있는 알고리즘으로 구현되었다. 앞으로 물리적 특성에 기반한 색재현에 있어서 디스플레이 장치의 동적범위를 고려한 향상된 색변환기법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 이명영, 이철희, 이호근, 하영호, "실사영상 재현을 위한 분광분포 기반의 광선추적기법," 대한전자공학회 논문지, Vol. 41, No. 1, pp. 37-46, 2004년 1월.
- [2] Thomas A. Funkhouser, "A Visibility Algorithm for Hybrid Geometry- and Image-based Modeling and Rendering," *Computers & Graphics*, Vol. 23, pp. 719-728, Oct. 1999.
- [3] Andrew Woo, Pierre Poulin, and Alain Fournier, "A Survey of Shadow Algorithms," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 10, No. 6, Nov. pp. 13-32, Nov./Dec. 1990.
- [4] J. Arvo, "Backward Ray Tracing," Tutorial Notes on the Developments in Ray Tracing *SIGGRAPH 86*, Aug. 1986.
- [5] Whitted J. T, "An Improved Illumination Model for Shaded Display," *Comm. ACM*, Vol. 23, No. 6, pp. 342-349, June 1980.
- [6] Alan Watt, *3D Computer Graphics*, Addison-Wesley, 2000.
- [7] Glassner, A. S., "Space Subdivision for Fast Ray Tracing," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol. 4, No. 10, pp. 15-22, Oct. 1984.
- [8] Phong B, "Illumination for Computer-Generated Pictures," *Comm. ACM*, Vol. 18, No. 6, pp. 311-317, June 1975.
- [9] Ashikhmin. M and Shirley. P, "An Anisotropic Phong BRDF Model," *Journal of Graphics Tools*, Vol. 5, No. 2, pp. 25-32, Aug. 2000.
- [10] Moller T. and Trumbore B., "Fast, minimum storage ray-triangle intersection," *Journal of*

- Graphics Tools*, Vol. 2, No. 1, pp. 21-28, 1997.
- [11] Roy S. Berns, *Principles of Color Technology*, Wiley Interscience.
- [12] Roy S. Berns, "Methods for characterizing CRT displays," *Displays*, Vol. 16, No. 4, pp. 173-182, 1996.
- [13] Post, D.L and Calhoun, C.S, "An evaluation of methods for producing desired colors on CRT monitors," *Color Research and Application*, vol. 14, pp. 172-186, 1989.
- [14] Peter Shirley and Changyaw Wang, "Direct Lighting Calculation by Monte Carlo Integration," *Proceedings of the 2nd Eurographics Rendering Workshop*, June 1991.

 저 자 소 개



이 명 영(학생회원)
 2000년 동명대학교 정보통신
 공학과(공학사).
 2003년 경북대학교 전자공학과
 (공학석사).
 2005년 경북대학교 전자공학과
 박사과정 수료.

<주관심분야 : 컴퓨터 그래픽, 색관리 시스템, 다
 중스펙트럼 영상처리>

하 영 호(평생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 38권 SP편 제 3호 참조

이 철 희(정회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 41권 SP편 제 1호 참조