

# 양방향 반사율 분포함수 측정시스템

황지수<sup>†</sup>

한국표준과학연구원 기반표준본부 온도광도센터  
Ⓞ 305-340 대전 유성구 도룡동 1번지

(2010년 2월 24일 받음, 2010년 4월 9일 수정본 받음, 2010년 4월 12일 게재 확정)

본 논문에서는 양방향 반사율 분포함수의 이론과 제작된 측정시스템 및 측정불확도의 평가방법을 소개한다. (380~1500) nm의 분광 양방향 반사율 분포함수를 (-75~75)°의 각도 범위에서 측정할 수 있는 측정시스템을 제작하였고, 상관관계가 있는 불확도 성분과 상관관계가 없는 불확도 성분으로 나누어 측정불확도를 평가하였다. 평가 결과, 제작된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템의 상대확장불확도는 3% ( $k=2$ ) 이하로 평가되었다.

## Measurement System of Bidirectional Reflectance-distribution Function

Jisoo Hwang<sup>†</sup>

Center for Temperature & Light, Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science,  
1 Doryong-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-340, Korea

(Received February 24, 2010; Revised manuscript April 9, 2010; Accepted April 12, 2010)

A theory of bidirectional reflectance-distribution function (BRDF), a newly developed BRDF measurement system, and a method for evaluating the uncertainty of BRDF measurements are presented. The BRDF measurement system which measures BRDF in a wavelength range of (380~1500) nm with an angle range of (-75~75)° was installed. The measurement uncertainties, consisting of correlated terms and uncorrelated terms, were evaluated for the BRDF measurement system, resulting in the relative expanded uncertainty less than 3% ( $k=2$ ).

Keywords: Bidirectional reflectance-distribution function, Bidirectional reflectance factor

OCIS codes: (120.0120) Instrumentation, measurement, and metrology; (120.3930) Metrological instrumentation; (120.3940) Metrology; (120.5700) Reflection

### I. 서 론

양방향 반사율 분포함수(Bidirectional reflectance-distribution function:BRDF)와 양방향 반사율 인수(Bidirectional reflectance factor)는 물체의 색 현시(color appearance) 특성을 나타내는 양이다. 즉, 빛이 입사하는 방향과 관찰자가 보는 방향에 따른 정반사와 확산반사 등의 물체의 반사 특성을 측정하여 물체의 양방향 반사율 분포를 결정하고, 외부 조명 환경에 따른 물체의 색 현시 특성을 예측할 수 있다. 양방향 반사율 분포함수의 측정기술은 색채 산업뿐만 아니라 e-paper 등의 반사형 디스플레이의 평가기술로 사용되며, 광측정과 복사 측정기기 교정에 사용된다. 이러한 산업 수요에 대응하는 측정 표준을 제공하기 위하여, 세계 표준기관들은 각조정기

(goniometer)를 이용한 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 개발하고 측정불확도를 향상시켜왔다.<sup>[1-6]</sup> 독일의 Physikalisch-Technische Bundesanstalt에서는 (200~1700) nm의 파장범위에서 3.5% ( $k=2$ ) 이하의 측정불확도로 양방향 반사율 분포함수를 측정할 수 있는 5축 로봇을 이용한 3차원 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 제작하였다.<sup>[1]</sup> 핀란드의 Helsinki University of Technology와 영국의 National Physical Laboratory에서는 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 이용하여 분광 확산 반사율 눈금을 실현하였다.<sup>[2-4]</sup> 특히, Helsinki University of Technology에서는 각조정 방식으로 측정된 양방향 반사율 인수를 적분하여 얻은 확산 반사율과 적분구를 이용하여 얻은 확산 반사율 사이의 차이를 규명하기 위하여 산란광이 각조정 방식의 측정에 미치는 영향에 대한 연구를

<sup>†</sup>E-mail: jhwang@kriss.re.kr

수행하였다.<sup>[2, 3]</sup> 미국의 National Institute of Standards and Technology에서는 (200~2500) nm의 파장범위에서 측정 가능한 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 구축하였고, 측정불확도는 1.2% ( $k=2$ ) 이하이다.<sup>[5, 6]</sup>

한국표준과학연구원에서는 (380~1500) nm의 파장범위에서 3% ( $k=2$ ) 이하의 측정불확도로 측정 가능한 절대측정 방식의 분광 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 개발하였다. 본 논문에서는 양방향 반사율 분포함수를 소개하고 측정시스템의 제작과 불확도 평가방법을 소개하고자 한다. 2절에서 양방향 반사율 분포함수 측정 이론을 소개하고, 3절에서는 개발된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 설명한다. 4절에서 측정불확도의 평가에 대해 고찰한 후, 5절에서 양방향 반사율 분포함수 측정에 대한 예로서 확산반사 시료의 측정결과를 소개할 것이다.

## II. 양방향 반사율 분포함수 측정 이론

양방향 반사율 분포함수는 미소 입체각 ( $d\omega_i, d\omega_r$ )에 대하여 입사각 ( $\theta_i, \phi_i$ )의 방향으로 시료에 입사한 복사조도  $E_i$ 에 대한 시료의 동일한 면적에서 반사각 ( $\theta_r, \phi_r$ )의 방향으로 반사되는 복사휘도  $L_r$ 의 비로 정의된다.(그림 1) 빛이 입사하는 시료의 면적에 대한 균일성과 등방성을 가정하면, 양방향 반사율 분포함수  $f_r$ 은 식 (1)로 표현될 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma) = \frac{dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma)}{dE_i(\theta_i, \phi_i; \lambda; \sigma)} \quad (1)$$

여기에서  $\lambda$ 와  $\sigma$ 는 각각 파장과 편광을 나타낸다. 입사 면적  $dA_i$ 에 균일하고 시준된 등방성 빛이 입사할 경우, 빛의 진행 경로 상에서 시료를 제거하고 수광기의 구경 조리개 내로 모든 빛이 입사되도록 하여 입사 복사조도를 측정한다. 따라서 입사 복사조도는 파장과 편광만의 함수  $E_i(\lambda, \sigma)$ 로 표현된다. 또한 복사조도는 복사선속을 입사 면적으로 나눈 양이고, 복사휘도는 복사선속을 면적과 입체각으로 나눈 양

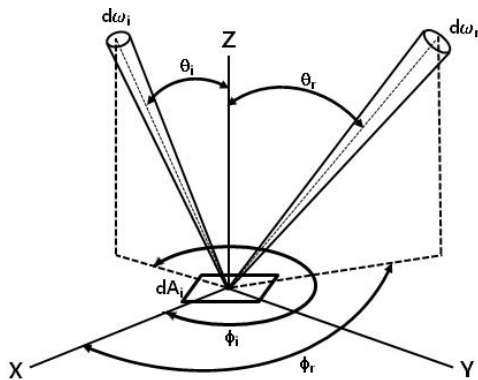


FIG. 1. Geometry of BRDF measurement

에 해당한다. 따라서, 미소 입체각 ( $d\omega_i, d\omega_r$ )에 대한 입사 복사조도와 반사 복사휘도를 각각 입사 복사선속  $\Phi_i$  및 반사 복사선속  $\Phi_r$ 로 표현하면 식 (2)와 같다.

$$dE_i(\lambda; \sigma) = \frac{d\Phi_i(\lambda; \sigma)}{dA_i} \quad (2)$$

$$dL_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma) = \frac{d\Phi_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma)}{dA_i} \cdot \frac{1}{\cos\theta_r \Omega_r}$$

여기에서  $\Omega_r$ 은 입사 면적으로부터 수광기의 구경 조리개 간의 입체각에 해당한다.  $\Omega_r$ 를 시료에서 검출 시스템의 구경 조리개까지의 거리  $D$ 와 구경 조리개의 단면적  $A_r$ 로 표시하면 다음과 같다.

$$\Omega_r = \frac{A_r}{D^2} \quad (3)$$

식 (2)를 이용하여 식 (1)을 표현하면 양방향 반사율 분포함수는 다음의 식으로 표현된다.<sup>[5, 6]</sup>

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma) = \frac{d\Phi_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma)}{d\Phi_i(\lambda; \sigma)} \cdot \frac{1}{\cos\theta_r \Omega_r} \quad (4)$$

양방향 반사율 분포함수는 0에서 무한대까지의 값을 가지며, 단위는 [ $\text{sr}^{-1}$ ]이다. 이상적인 완전반사 확산체(perfectly reflecting diffuser)의 경우, 양방향 반사율 분포함수는  $1/\pi$ 이다. 양방향 반사율 인수는 동일한 조명 조건에서 이상적인 완전반사 확산체에서 반사되는 복사선속에 대한 시료의 반사 복사선속의 비로서, 식 (5)와 같이 양방향 반사율 분포함수를 이용하여 표현된다.

$$R(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) = \pi \cdot f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r) \quad (5)$$

등방성 시료의 경우, 입사각과 반사각의 극각 변화에 대한 양방향 반사율 분포함수를 측정하여 시료의 반사분포 특성을 결정할 수 있다. 반사율 표준판은 등방성 시료로 가정할 수 있고, 또한 디스플레이를 평가할 때 극각을 변화시키며 양방향 반사율 분포함수를 측정한다.<sup>[7]</sup> 따라서 본 실험에서는 극각을 변화시킬 수 있는 2차원 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 제작하였다. 또한 복사선속은 측정신호를 검출기의 감응도로 나눈 양에 해당하므로, 식 (4)를 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$f_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma) = \frac{S_r(\theta_i, \phi_i; \theta_r, \phi_r; \lambda; \sigma)}{S_i(\lambda; \sigma)} \cdot \frac{R_i(\lambda; \sigma)}{R_r(\lambda; \sigma)} \cdot \frac{1}{\cos\theta_r \Omega_r} \quad (6)$$

여기에서  $S_i$ 와  $S_r$ 은 각각 입사 선속 및 반사 선속의 측정신호이고,  $R_i$ 와  $R_r$ 은 입사 선속 및 반사 선속 측정시의 검출기의 감응도에 해당한다.

### III. 양방향 반사를 분포함수 측정시스템

제작된 양방향 반사를 분포함수 측정시스템은 광원 시스템, 각조정기 및 수광 시스템으로 구성되며, 컴퓨터로 자동 제어된다. 그림 2에 장치도가 표시되어 있다.

광원 시스템에 의해 파장영역 (380~1500) nm의 시준된 단색광이 형성된다. 각조정기는 시료의 회전과 수광기의 회전을 위한 두 개의 회전 스테이지로 구성된다. 두 회전 스테이지는 동일한 회전축을 가지며, 회전각은 (-75~75)°에 해당한다. 시료의 선형 이동을 위하여 각조정기의 중앙에 3축 선형 스테이지를 설치하고, 그 위에 시료대를 설치하였다. 검출기는 시료를 중심으로 회전하며, 시료와 검출기 간의 입체각을 결정하기 위하여 구경 조리개와 렌즈 및 광다이오드로 구성된 검출 시스템을 사용하였다. 파장영역에 따라 (380~1100) nm 파장영역에는 Si 광다이오드, (1100~1500) nm의 영역에는 InGaAs 광다이오드를 사용하였다.

#### 3.1. 광원 시스템

광원 시스템은 텅스텐-할로겐 램프, 회절차수 분리필터 (order sorting filter), 단색기(monochromator), 광섬유, 시준용 렌즈, 편광기, 구경으로 구성된다.(그림 2) 150 W 출력의 텅스텐-할로겐 램프에 F수가 3.9 인 1/8 m 단색기와 회절차수 분리필터를 부착하여 사용하였다. 단색기 내에 섬광 파장(blaze wavelength)과 그루브(groove)가 각각 240 nm, 750 nm인 2400 lines/mm, 1200 lines/mm의 두 개의 회절 격자를 설치하여 각각 가시광선 영역 및 근적외선 파장에서 사용하였다. 고회절 차수(higher diffraction order) 성분에 의한 잡광(stray light)을 제거하기 위하여 파장 범위에 따라 5 종류의 회절차수 분리필터(장파 대역 필터)를 사용하였다.

2400 lines/mm의 회절 격자를 사용할 경우, 단색기를 통과

한 빛살의 대역폭은 1.2 mm 폭의 슬릿에 대하여 약 4 nm (반치폭), 2.4 mm 슬릿에 대하여 약 6 nm이다. 1200 lines/mm 회절 격자의 경우, 1.2 mm 폭의 슬릿에 대하여 대역폭은 약 8 nm로 측정되었다. 단색기를 통과한 빛살은 광섬유를 거쳐 시준 렌즈에서 시준된다. 시준된 빛살의 직경은 약 17 mm이며 발산각은 2°미만이다. 편광에 따른 양방향 반사율 분포함수의 측정을 위하여 글랜-테일러(Glan-Taylor) 편광기를 사용하였고, 편광된 빛은 배플(baffle)을 거쳐 시료에 입사된다.

#### 3.2. 각조정기와 검출 시스템

각조정기는 5축 시스템으로서 수광기와 시료를 각각 회전시킬 수 있는 두 개의 회전 스테이지와 시료의 위치 변경을 위한 3개의 선형 스테이지로 구성된다. 회전 스테이지는 (-75~75)°의 입사각과 반사각을 형성하며, 분해능은 0.0001°, 반복성은 0.001°에 해당한다. 3축 선형 스테이지의 분해능은 0.0001 mm, 반복성은 0.001 mm이다. 수광 시스템은 시료를 중심으로 하여 회전하며, 회전팔의 길이는 약 800 mm이다. 수광기는 파장영역에 따라 (380~1100) nm 파장영역에는 Si 광다이오드, (1100~1500) nm의 영역에는 InGaAs 광다이오드를 사용하였다. 입사광은 광단속기를 거쳐 시료에 입사되고 광다이오드에서 측정된 신호는 전치 증폭기(preamplifier)와 락-인 증폭기(lock-in amplifier)에서 증폭된 후 전압으로 변환되어 6 1/2 디지트의 디지털 전압계로 측정된다.

식 (3)에서 볼 수 있듯이, 양방향 반사율 분포함수를 결정하기 위해서는 시료로부터 검출 시스템의 구경 조리개 간의 입체각을 측정해야 한다. 본 실험에서는 직경 40 mm의 구경 조리개와 렌즈 및 광다이오드로 구성된 검출 시스템을 사용하였다. 입사 선속을 측정할 때, 모든 빛살은 구경 조리개 안을 통과한 후 렌즈에 의해 광다이오드의 감지 면적 내로 초점이 모아져 검출된다. 반사된 선속을 측정할 때, 구경 조리

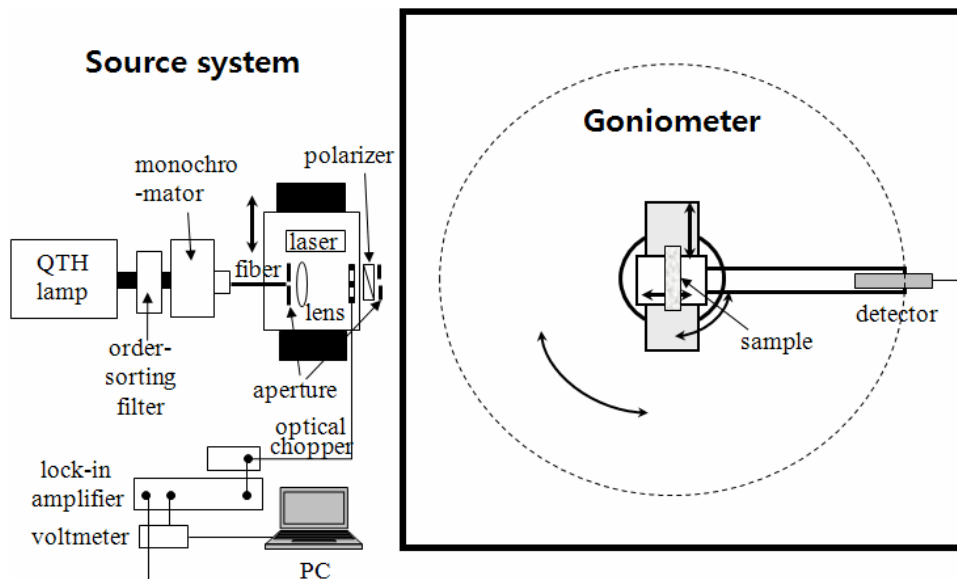


FIG. 2. BRDF measurement system.

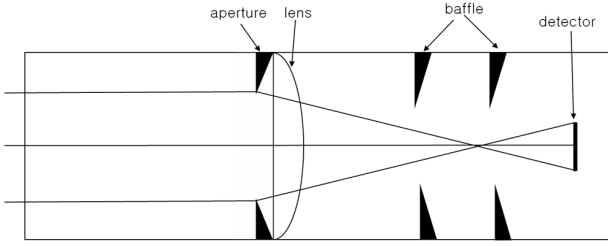


FIG. 3. Detection system of BRDF measurement system.

개의 면적과 시료와 구경 조리개 간의 거리는 반사 입체각  $\Omega_r$ 을 결정하며 광다이오드의 검출 면적은 시야 조리개에 해당한다. 구경 조리개와 렌즈 및 광다이오드를 직경 2인치의 경통 내에 설치하고, 렌즈와 광다이오드 사이에 배플을 설치하여 후방 반사에 의한 잡광을 억제하였다.(그림 3)

InGaAs 광다이오드의 경우, 검출 면적이 작고 위치에 따른 측정신호의 균일성이 좋지 않으므로 경통의 끝단에 직경 2인치의 적분구를 설치하고 적분구 위에 InGaAs 광다이오드를 설치하였다. 시야 조리개에 해당하는 Si 광다이오드의 검출 면적은  $(10 \times 10) \text{ mm}^2$ , InGaAs 광다이오드와 함께 사용된 적분구의 포트 직경은 0.5 인치이다. 시료와 구경 조리개 사이의 거리는 678.0 mm로서, 제작된 검출 시스템의 조리개의 각은  $1.7^\circ$ , 입체각은  $2.73 \times 10^{-3} \text{ sr}$ 에 해당한다.

#### IV. 양방향 반사율 분포함수 측정시스템의 불확도 평가

측정불확도는 측정 결과의 신뢰성을 나타내는 용어로서 1993년 국제표준화기구(ISO)에서 측정불확도 표현 지침서 (*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*)를 발행한 후, 이 지침서에 따라서 측정불확도를 구하고 표현하는 방법이 전 세계적으로 많은 분야에 확산되어 사용되고 있다. 측정불확도는 측정결과에 관련하여 측정량을 합리적으로 추정할 값의 분산 특성을 나타내는 파라미터로서, 이 파라미터는 표준편차나 명시된 신뢰구간의 반너비 등이 될 수 있다. 측정불확도를 평가하기 위하여, 측정량과 측정량을 결정하는데 사용되는 입력량들의 함수관계인 측정의 수학적 모델을 세우고 식 (7)의 불확도 전파법칙에 따라 각 성분들의 표준불확도를 합성하여 합성표준불확도를 나타낸다.<sup>[8, 9]</sup>

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 \quad (7)$$

여기에서  $y$ 는 측정량의 추정값,  $x_i$ 는 입력량의 추정값이며  $c_i (\equiv \partial f / \partial x_i)$ 는 감도계수이다.

본 실험에서 사용한 검출기는 측정시간 동안 감응도가 변하지 않으므로, 식 (3)과 (6)으로부터 측정의 수학적 모델을 결정하였다.

$$f_r(\theta_i; \theta_r; \lambda; \sigma) = \frac{S_r(\theta_i; \theta_r; \lambda; \sigma)}{S_i(\lambda; \sigma)} \cdot \frac{D^2}{A_r \cos \theta_r} \quad (8)$$

식 (7)의 불확도 전파법칙에 따라 각 성분들의 표준불확도를 합성하여 시료의 양방향 반사율 분포함수에 대한 합성표준불확도를 나타낸다. 입사 복사선속과 반사된 복사선속은 동일한 검출기로 측정되므로 서로 상관관계가 있다. 상관관계가 있는 불확도 성분은 파장과 단색기의 이색성 잡광 (heterochromatic stray light)에 의한 불확도를 포함한다. 측정 신호들의 상관계수는 1로 가정하고, 각 측정신호들의 표준불확도를 상관관계가 없는 독립적인 불확도 성분( $X_{uncorr}$ )과 상관관계가 있는 불확도 성분( $X_{corr}$ )으로 분리하여 표현하면 상대합성표준불확도는 식 (9)와 같다.

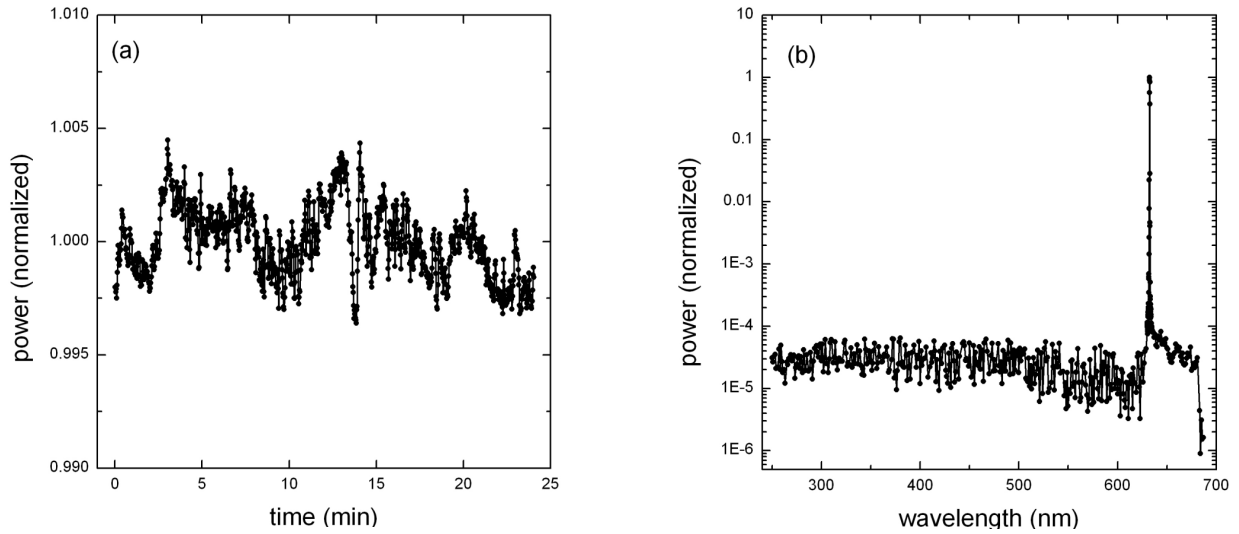
$$u_{rc}(f_r) = \left[ u_r^2(S_r)_{uncorr} + u_r^2(S_i)_{uncorr} + 2u_r^2(D) + u_r^2(A_r) + u_r^2(\cos \theta_r) + \left\{ \frac{u(S_r)_{\lambda, corr}}{S_r} - \frac{u(S_i)_{\lambda, corr}}{S_i} \right\}^2 + \left\{ \frac{u(S_r)_{hsl, corr}}{S_r} - \frac{u(S_i)_{hsl, corr}}{S_i} \right\}^2 \right]^{1/2} \quad (9)$$

여기에서  $u_r(S_r)_{\lambda, corr}$ 와  $u_r(S_i)_{\lambda, corr}$ 는 파장에 의한 반사된 복사선속 측정신호의 상대불확도와 입사선속 측정신호의 상대불확도에 해당하며,  $u_r(S_r)_{hsl, corr}$ 와  $u_r(S_i)_{hsl, corr}$ 는 단색기의 이색성 잡광에 의한 반사된 복사선속 측정신호의 상대불확도 및 입사선속 측정신호의 상대불확도에 해당한다.  $u_r(S_r)_{\lambda, corr}$ ,  $u_r(S_i)_{\lambda, corr}$ ,  $u_r(S_r)_{hsl, corr}$ ,  $u_r(S_i)_{hsl, corr}$ 는 모두 상관관계가 있는 불확도 성분이다. 상관관계가 없는 불확도 성분은 상관관계가 없는 반사된 복사선속 측정신호의 상대불확도  $u_r(S_r)_{uncorr}$ 와 입사 복사선속 측정신호의 상대불확도  $u_r(S_i)_{uncorr}$ , 시료 표면의 중앙으로부터 검출 시스템의 구경 조리개까지의 거리 측정에 따른 상대불확도  $u_r(D)$ , 구경 조리개의 단면적 측정에 따른 불확도  $u_r(A_r)$ , 반사각 측정에 따른 상대불확도  $u_r(\cos \theta_r)$ 를 포함한다.

##### 4.1. 상관관계가 없는 불확도 성분의 평가

반사된 복사선속 측정신호의 상대불확도  $u_r(S_r)_{uncorr}$ 는 반복성, 신호 측정의 직선성, 광전류 측정, 산란광에 의해 시료에서 되반사되는 잡광, 반사각의 불확도를 합성하여 산출하였다. 입사 복사선속 측정신호의 상대불확도  $u_r(S_i)_{uncorr}$ 는 반복성, 신호 측정의 직선성, 광전류 측정의 불확도 성분을 포함한다.

반복성은 광원 및 검출기의 안정성 및 동일 시료에 대한 반복성을 포함하여 평가하였다. 그림 4(a)는 파장 600 nm에서 Si 광다이오드를 사용하여 24분간 측정된 광원 안정도이다. 신호 측정의 직선성은 별도의 실험을 통하여 산출하였다. 즉, 적분구에 2개의 LED를 설치하여 한 개의 LED가 각각 켜졌을 때 측정된 신호들의 합과 두개의 LED가 켜졌을 때의 신호를 비교하여 산출하였다. Si 광다이오드의 경우 상대불확도는 0.03%이고, 락-인 증폭기와 함께 사용할 경우에는 Si 광다이오드와 InGaAs 광다이오드의 상대불확도 모두 0.1%



**FIG. 4.** Measured results of (a) stability of the source using the Si photodiode at a wavelength of 600 nm and (b) heterochromatic stray light using a 632.8 nm HeNe laser. In (b), heterochromatic stray light is plotted as a function of a wavelength of the monochromator.

이하로 평가되었다. 광진류 측정의 불확도 성분은 전압계의 교정 성적서에 명시된 교정 불확도 및 락-인 증폭기의 정확성으로부터 평가하였다. 산란광에 의해 시료에서 되반사되는 잡광에 의한 불확도는 광경로를 백색판으로 막은 상태에서 측정하여 산출하였고, 0.06%이하로 평가되었다. 반사각의 불확도는 검출 시스템의 구경 조리개 위치에 조리개를 놓고 구경 면적을 조절하며 측정하였다. 재현성 0.01° 및 분해능 0.001°를 포함하여 반사각의 불확도는 0.1°이하로 평가되었다. 시료 표면의 중앙으로부터 검출 시스템의 구경 조리개까지의 거리 측정에 따른 불확도와 구경 조리개의 단면적 측정에 따른 불확도는 반복측정을 통하여 산출하였다.

**4.2. 상관관계가 있는 불확도 성분의 평가**

$u(S_r)_{\lambda,corr}$ ,  $u(S_i)_{\lambda,corr}$ 는 파장 오프셋에 의한 측정신호의 상관 불확도 성분으로서, 파장의 불확도  $u(\lambda)$ 를 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} u(S_r)_{\lambda,corr} &= \left( \frac{\partial S_r}{\partial \lambda} \right) u(\lambda) \\ u(S_i)_{\lambda,corr} &= \left( \frac{\partial S_i}{\partial \lambda} \right) u(\lambda) \end{aligned} \tag{10}$$

파장 교정용 램프 (HgNe, Kr, Ar)를 사용하여 파장을 교정하고 파장 오프셋 및 재현성을 측정하여 파장의 불확도  $u(\lambda)$ 를 산출하였다. 파장 오프셋은 (380~900) nm의 파장 범위에서는 0.3 nm 이하, (900~1500) nm 범위에서는 0.8 nm 이하로 측정되었다.

$u(S_r)_{hsl,corr}$ 와  $u(S_i)_{hsl,corr}$ 는 각각 반사된 복사선속 및 입사 복사선속 측정신호 측정시 발생하는 단색기의 이색성 잡광에 의한 불확도로서, 측정파장  $\lambda$ 외의 파장성분에 의한 불확도 성분을 나타낸다. 입사광과 반사광의 대역폭인  $\Delta\lambda$ 를 고려하

면, 식 (11)로 표현된다.

$$\begin{aligned} u(S_r(\lambda))_{hsl,corr} &= \int_0^{\lambda-\Delta\lambda} S_r(\lambda') d\lambda' + \int_{\lambda+\Delta\lambda}^{\infty} S_r(\lambda') d\lambda', \\ u(S_i(\lambda))_{hsl,corr} &= \int_0^{\lambda-\Delta\lambda} S_i(\lambda') d\lambda' + \int_{\lambda+\Delta\lambda}^{\infty} S_i(\lambda') d\lambda'. \end{aligned} \tag{11}$$

입사 복사선속 측정신호의 이색성 잡광 성분  $S_i(\lambda')$ 을 상수로 가정하면, 식 (11)은 식 (12)의 형태가 된다.

$$\begin{aligned} u(S_r(\lambda))_{hsl,corr} &\cong S_i(\lambda') \left[ \int_0^{\lambda-\Delta\lambda} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' + \int_{\lambda+\Delta\lambda}^{\infty} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' \right] \\ u(S_i(\lambda))_{hsl,corr} &\cong S_i(\lambda') \left[ \int_0^{\lambda-\Delta\lambda} d\lambda' + \int_{\lambda+\Delta\lambda}^{\infty} d\lambda' \right] \end{aligned} \tag{12}$$

$S_i(\lambda') / S_i(\lambda) \equiv u_r(S_i(\lambda, \lambda'))$ 로 정의하고 회절차수 분리필터의 투과 파장영역과 검출기의 감응도 파장영역을 고려하면, 식 (9)의 이색성 잡광에 의한 항은 식 (13)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} &\left( \frac{u(S_r)_{hsl,corr} - u(S_i)_{hsl,corr}}{S_r} \right) \\ &\cong u_r(S_i(\lambda, \lambda')) \left[ \frac{S_r(\lambda)}{S_r(\lambda)} \int_{\lambda_{cut-on}}^{\lambda-\Delta\lambda} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' + \frac{S_r(\lambda)}{S_r(\lambda)} \int_{\lambda+\Delta\lambda}^{\lambda_{DHL}} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' - (\lambda_{DHL} - 2\Delta\lambda - \lambda_{cut-on}) \right] \end{aligned} \tag{13}$$

여기에서  $\lambda_{cut-on}$ 은 회절차수 분리필터의 투과영역 중 가장 짧은 파장이고,  $\lambda_{DHL}$ 은 검출기의 검출 파장영역 중 가장 긴 파장에 해당한다.

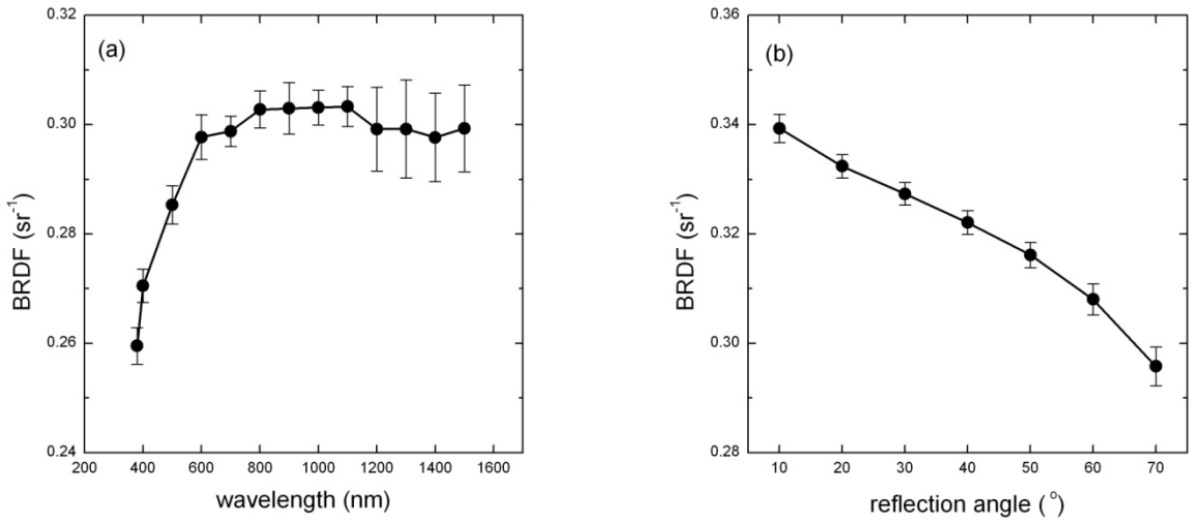
파장 632.8 nm의 HeNe laser를 사용하여 0.005%이하의 단색기의 이색성 잡광을 측정하였고, 1064 nm Nd:YAG laser를 사용한 실험을 통하여 근적외선 영역에서도 동일한 수준의 잡광이 측정되었다. 그림 4(b)는 632.8 nm의 HeNe laser를 사

**TABLE 1.** Uncertainty Budget for the BRDF measurement system

Uncertainty Term	Component Description	Relative Standard Uncertainty (%)			Sensitivity coefficient	Probability Distribution
		Wavelength				
		400 nm	800 nm	1200 nm		
$u_r(S_r)_{\text{uncorr}}$	reading of signal on reflected radiant flux	0.37	0.36	1.15	1	normal
$u_r(S_i)_{\text{uncorr}}$	reading of signal on incident radiant flux	0.27	0.2	0.25	1	rectangular
$u(\lambda)$	wavelength	0.3 nm		0.8 nm	$c(\lambda)^a$	normal
$u_r(S_i(\lambda, \lambda'))$	heterochromatic stray light	<0.005			$c(S_i(\lambda, \lambda'))^b$	rectangular
$u_r(D)$	distance from sample to aperture stop of detection system	0.05			2	$t$
$u_r(A_r)$	area of aperture stop of detection system	0.08			1	$t$
$u_r(\cos\theta_r)$	Reflection angle (of 60°)	0.29			1	normal
$u_{rc}(f_r)$	combined standard uncertainty	0.6	0.6	1.2		normal

$$^a c(\lambda) = \left( \frac{1}{S_r} \frac{\partial S_r}{\partial \lambda} - \frac{1}{S_i} \frac{\partial S_i}{\partial \lambda} \right)$$

$$^b c(S_i(\lambda, \lambda')) = \left[ \frac{S_r(\lambda)}{S_r(\lambda)} \int_{\lambda_{\text{cut-on}}}^{\lambda - \Delta\lambda} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' + \frac{S_r(\lambda)}{S_r(\lambda)} \int_{\lambda + \Delta\lambda}^{\lambda_{\text{DHL}}} \frac{S_r(\lambda')}{S_i(\lambda')} d\lambda' - (\lambda_{\text{DHL}} - 2\Delta\lambda - \lambda_{\text{cut-on}}) \right]$$



**FIG. 5.** BRDF of a white diffuse sample are plotted (a) for 0° incident angle and 60° reflection angle in a wavelength range of (380~1500) nm with an interval of 100 nm from 400 nm and (b) for 0° incident angle and reflection angle from 10° to 70° with an interval of 10° at fixed wavelength of 700 nm. The incident beam is p-polarized for (a) and unpolarized for (b). The error bars correspond to the expanded uncertainties ( $k=2$ ).

용하여 측정된 단색기의 이색성 잡광의 측정 결과이다.  
 표 1은 위에서 기술한 양방향 반사율 분포함수의 측정불확도 평가 방법으로 산출한 불확도 총괄표이다. 확산반사 시료에 대하여 파장 400 nm, 800 nm, 1200 nm에서 산출하였다. 제작된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템의 불확도는 (380~1500)nm의 파장 영역에 대하여 3% ( $k=2$ )이하로 평가되었다.

**V. 확산반사 시료의 양방향 반사율 분포함수 측정 결과**

제작된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템을 사용하여 백

색 세라믹으로 제작된 확산반사 시료의 양방향 반사율 분포함수를 측정하였다. 입사각 0°에 대하여 (-70~70)°범위내의 반사각을 10°간격으로 변화시키고, (380~1500) nm의 파장영역에서 400 nm부터 100 nm 간격으로 파장을 변화시키며 측정하였다. 그림 5(a)는 p 편광된 입사광이 시료에 입사할 때 입사각 0°와 반사각 60°에 대한 분광 양방향 반사율 분포함수의 측정 결과이며, 그림 5(b)는 700 nm의 편광되지 않은 단색광이 0°로 입사했을 때 반사각 (10~70)°에 대한 측정 결과이다. 그림 5(b)의 데이터 값은 (10~70)°의 측정치와 (-10~70)°의 측정치의 평균값에 해당하며 각각은 불확도 범위 내에서 일치하였다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 양방향 반사율 분포함수의 측정 이론과 절대측정 방식의 양방향 반사율 분포함수 측정시스템 제작 및 측정불확도 평가에 관하여 설명하였다. 구축된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템의 측정불확도는 (380~1500) nm 파장 영역에서 3% ( $k=2$ ) 이하로 평가되었고, 양방향 반사율 분포함수 측정의 예로써 백색 확산반사 시료의 측정결과를 소개하였다. 불확도의 주요 원인은 광원의 안정도와 관련된 측정신호의 반복성으로서, 측정신호의 불확도를 낮추기 위하여 광원의 안정도를 향상시키고 입사 모니터링 검출기를 사용하는 추가적인 장치 구축을 계획하고 있다. 개발된 양방향 반사율 분포함수 측정시스템은 절대측정 방식의 시스템으로서 분광 양방향 반사율 분포함수와 양방향 반사율 인수의 절대 눈금을 실현하며, 관련된 측정량의 소급성을 제공하여 색채, 디스플레이, 조명 산업 등에 활용된다.

## References

1. D. Hunerhoff, U. Grusemann, and A. Hope, "New robot-based gonireflectometer for measuring spectral diffuse reflection," *Metrologia* **43**, S11-S16 (2006).
2. S. Holopainen, F. Manoocheri, S. Nevas, and E. Ikonen, "Effect of light scattering from source optics in goniometric diffuse reflectance measurements," *Metrologia* **44**, 167-170 (2007).
3. S. Nevas, F. Manoocheri, and E. Ikonen, "Gonioreflectometer for measuring spectral diffuse reflectance," *Appl. Opt.* **43**, 6391-6399 (2004).
4. D. C. Williams, "Establishment of absolute diffuse reflectance scales using the NPL reference reflectometer," *Anal. Chim. Acta.* **380**, 165-172 (1999).
5. P. Y. Barnes, E. A. Early, and A. C. Parr, NIST Measurement Services: Spectral Reflectance, NIST Special Publication 250-48 (1998).
6. J. E. Proctor and P. Y. Barnes, "NIST high accuracy reference reflectometer-spectrophotometer," *J. Res. Natl. Inst. of Stand. Technol.* **101**, 619-627 (1996).
7. Flat VESA Video Electronics Standards Association (VESA) Display Metrology Committee, "Flat panel display measurements standard," Version 2.0 (Video Electronics Standards Association, 2001).
8. KRIS-99-070-SP, KRIS Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (Korea Research Institute of Standards and Science, 1999).
9. ISO/IEC Guide 98-3:2008, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (International Organization for Standardization, 2008).