

# 등색함수 필터의 설계와 이를 이용한 LCD 평판 디스플레이의 색채 측정에 대한 오차 분석

전지호 · 조재흥

한남대학교 이과대학 물리학과  
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133번지

박승남<sup>†</sup> · 박철웅 · 이동훈 · 정기룡

한국표준과학연구원 온도광도그룹  
Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 도룡동 1번지

(2006년 11월 29일 받음, 2006년 11월 29일 수정본 받음)

필터와 검출기로 구성된 필터식 색채계의 분광감응도는 국제조명위원회(Commission Internationale de l'Eclairage, CIE)에서 정의한 등색함수와 일치해야 한다. 본 연구에서는 정확도가 높은 색채계에 적용할 수 있는 등색함수  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ 에 대한 필터를 상용화된 색필터를 조합하여 제작할 수 있도록 설계하였다. 특히 등색함수  $\bar{x}$ 는 두 개의 투과대역을 가지고 있기 때문에 파장 영역이 다른 2 개의 필터로 분리하여 실현하였다. 설계에는 색필터의 두께를 곡선 맞춤변수로 두고 비선형 최소제곱법으로 필터의 품질지수  $f_i'$  값을 최적화하는 프로그램을 개발하여 사용하였다. 그 결과 모든 필터의  $f_i'$  값이 3 % 이하가 되도록 설계할 수 있었으며,  $\bar{y}$  등색함수 필터를 실제로 제작하여  $f_i'$  측정값이 2.8 %임을 검증하였다. 또한 설계한 등색함수 필터로 색채계를 제작하여 LCD 평판 디스플레이의 색채 측정에 사용할 경우 발생하는 계통오차도 산출하였다.

주제어 : Color-matching function, Spectral mismatch value, Color difference, Color gamut

## I 서 론

고품질 디스플레이의 수요 증가와 관련 산업의 발전에 따라 디스플레이의 밝기(광휘도)와 색채 특성을 평가하는 측정 기술의 중요성도 커지고 있다. 색채 측정의 경우 디스플레이의 분광특성을 측정하여 국제조명위원회(CIE)가 정한 방법에 따라 색좌표로 정량화하게 되며 정확한 측정을 위해서는 교정된 분광복사계(spectroradiometer)를 사용하는 것이 일반적이다. 하지만 디스플레이 생산현장에서는 운반이 어렵고 측정시간이 긴 분광복사계보다는 사용이 간편한 필터식 삼자극 색채계(tri-stimulus colorimeter)를 많이 사용하고 있으며 이러한 경향은 광휘도 측정의 경우도 동일하다. 분광복사계는 주로 교정기관에서 표준기로 유지하며 필터식 색채계 및 광휘도계 교정에 사용하는 것이 일반적이다.

삼자극 색채계의 가장 중요한 부분은 세 개의 삼자극 등색함수  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ 를 구현하기 위하여 장착하는 등색함수 필터이며, 이는 일반적으로 여러 종류의 색유리 필터(colored glass filter)를 알맞은 두께로 조합하여 제작한다. 등색함수 필터를 장착한 색채계의 분광감응도가 각 등색함수와 일치하는 정도를 정량적으로 평가하는 방법에 대해서는 아직 국제적으로 채택된 규격이 없으나 많은 제작자들은 CIE가 제안한  $f_i'$  값을 사용하고 있다.  $f_i'$  값은 원래 광도계(photometer) 평가를 위하여 사용되는 양으로 분광감응도와 시감효율함수의

파장별 차이를 정량화하여 그 값이 3 % 이하가 될 때 우수하다고 하고 8 % 이상일 되면 품질이 나쁘다고 한다. 고품질 광도계의 경우  $f_i'$  값이 1.5 % 이하인 제품도 상용화되어 있다. 그러나 색채계의 경우 광도계의 시감효율함수와 동일한  $\bar{y}$  등색함수만이 1.5 % 이하의  $f_i'$  값으로 실현 가능하고  $\bar{x}$  및  $\bar{z}$  등색함수는 이에 미치지 못한다.<sup>[1]</sup> 그 이유는  $\bar{x}$  및  $\bar{z}$  등색함수를 제작하는데 사용할 수 있는 상용화된 색필터가  $\bar{y}$  등색함수에 비해 크게 제한되어 있기 때문이다. 따라서 한정된 색필터를 조합하여 각 등색함수의  $f_i'$  값이 3 % 이하가 되도록 실현한다면 매우 정확도가 높은 색채계로 평가할 수 있다.

우리는 상용화된 몇 가지의 색필터를 사용하여  $f_i'$  값이 3 % 이하가 되는 고품질의 삼자극 등색함수 필터를 설계하고 그 중 하나를 실제로 제작하여 실험적으로 검증하였다. 설계에는 다양한 색필터의 두께를 맞춤변수로 하여 필요한 색필터의 종류와 두께를 비선형 최소제곱법으로 최적의 조합을 찾아주는 프로그램을 개발하여 사용하였다. 또한 설계한  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  필터로 색채계를 제작하여 LCD 평판 디스플레이에 사용할 경우 발생하는 계통오차를 분석함으로써 설계한 등색함수 필터의 품질 평가에 대하여 논하고자 한다.

## II 이 론

### 2.1. 색채 측정

인간의 눈이 색에 대하여 반응하는 특성을 정량화하기 위

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

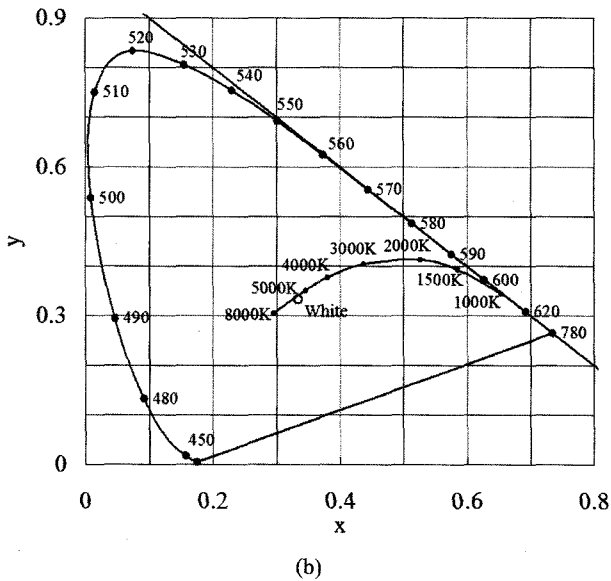
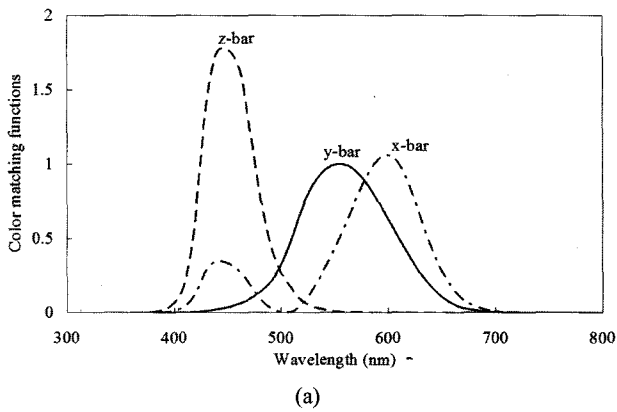


Fig. 1. (a) Color-matching functions  $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$  for a 2-degree field (CIE 1931), (b) chromaticity x-y diagram for a 2-degree field (CIE 1931).

해 많은 색대응(color matching) 실험이 이루어졌고 이에 관한 기초적인 법칙은 Grassmann에 의해서 확립되었다.<sup>[2]</sup> 색대응 실험은 순수한 단색광(pure monochromatic light)을 조명하는 기준 영역(reference field)과 색깔과 채도, 명도가 정의된 세 가지 빛(red: 700nm, green: 546.1nm, blue: 435.8nm)을 조합하여 조명하는 색 대응 영역(matched field)을 나누어 두 영역의 색을 비교하여 일치하는 것을 찾는 실험이다. 특정한 표준 관측자와 관측 조건에서 수행한 여러 색대응 실험을 통해 CIE는 1931년 인간의 시각에 대응하는 세 가지 등색함수(color matching function)  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ 를 파장에 대한 함수로 그림 1(a)와 같이 정의하였다. 이 함수에 따라 일정한 분광 복사휘도(spectral radiance)  $P(\lambda)$ 를 갖는 광원(non-monochromatic light)의 삼자극치(tristimulus value)는 다음 식 (1)에서와 같이 얻는다.

$$X = K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

여기서  $K_m$ 은 최대 분광 시각효능(683 lm/W)이고,  $\bar{y}(\lambda)$ 는 시각효능함수  $V(\lambda)$ 와 같아서  $Y$ 는 광원  $P(\lambda)$ 의 광휘도(luminance)를 나타낸다. 식 (1)로부터 광원의 색도좌표  $x, y, z$ 를 다음 식에 따라 구한다.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

이렇게 식 (2)에 따라 계산된 광원의 색좌표는 그림 1(b)와 같이 말굽형태의 색도표(chromaticity x-y diagram)로 나타낼 수 있다.<sup>[2,3]</sup>

이와 같이 색을 측정하는 데에는 인간의 시각특성이 반영되므로 색도좌표를 측정하는 색채 측정장치, 즉 색채계는 표준관측자를 통하여 정의된 등색함수  $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 에 대응하는 분광 감응도(spectral responsivity)를 만들어 주는 등색함수 필터가 필요하다. 또한 등색함수 필터를 통해 보정된 색채계의 분광감응도가 각각의 등색함수와 일치하는 정도가 그 색채계의 불확도(uncertainty)를 결정한다.

## 2.2. 색필터 및 색채계

등색함수 필터는 다양한 분광 투과율을 가진 색필터를 적절한 두께로 조합하여 제작할 수 있다. 따라서 먼저 색필터의 분광 투과율을 두께에 대한 함수로 정량화하여야 한다. 그림 2와 같이 산란 없이 빛을 투과시키는 단일 평행판에 광선이 입사할 경우를 고려해보자. 평행판의 두께는  $w$ , 굴절률은  $n$ 이며 복사휘도가 1인 광선이 공기에서 매질로 입사할 때 입사각은  $\theta$ , 굴절각은  $\theta'$ 이라고 표시한다. 첫번째 경계면(공기-매질)에서 보면 투과된 복사휘도와 반사된 복사휘도는 각각  $\tau_1$ 과  $\rho_1$ 라 하고 두번째 경계면(매질-공기)에선  $\tau_2$ 과  $\rho_2$ 라고 한다. 매질 내부의 흡수에 의한 투과율은 다음의 식 (3)과 같이 표현되는 내부투과율  $\alpha$ 로 고려한다.

$$\alpha \equiv \frac{L(x)}{L(0)} = e^{-ax} \quad (3)$$

여기서  $a$ 는 흡수계수이고,  $L(0)$ 와  $L(x)$ 는 광선이 매질에 들어올 때와 나갈 때의 복사휘도이며,  $x$ 는 광선이 지나간 경로로  $x = -\frac{w}{\cos\theta'}$ 로 주어진다. 수직입사를 할 경우  $x = w$ 가

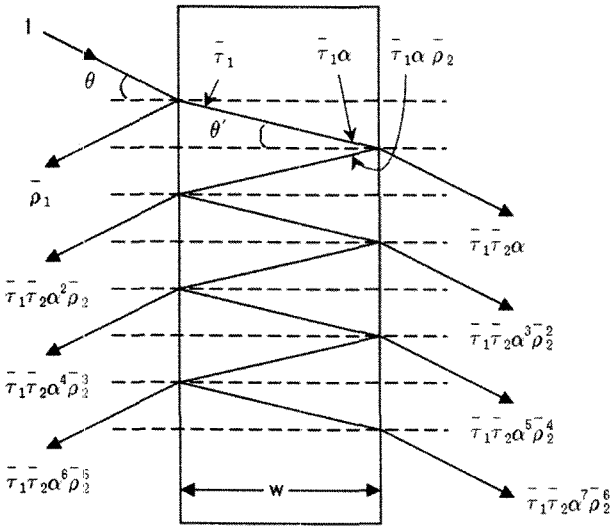


Fig. 2. Illustration of multiple reflections between two interfaces.

되므로 수직 내부투과율  $\alpha_w$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\alpha_w = e^{-aw} \quad (4)$$

식 (4)에 따라 두께가  $d$ 와  $w$ 로 서로 다른 동일 매질일 경우 다음과 같은 관계가 있음을 알 수 있다.

$$\alpha_d = \alpha_w^{d/w} \quad (5)$$

각도  $\theta$ 로 입사한 광선에 대해 평행판의 총 반사율  $R$ 은 그림 2에서 좌측 복사에너지의 총합이 되고, 총 투과율  $T$ 는 평행판 우측 복사에너지의 총합이 된다. 평행판이 충분히 넓어 반사와 투과가 무한히 일어난다고 가정하면 투과율  $T$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T &= \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha + \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha^3 \overline{\rho_2^2} + \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha^5 \overline{\rho_2^4} + \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha^7 \overline{\rho_2^6} + \dots \\ T &= \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha [1 + (\alpha \overline{\rho_2^2})^2 + (\alpha \overline{\rho_2^2})^4 + (\alpha \overline{\rho_2^2})^6 + \dots] \\ T &= \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha \sum_{i=0}^{\infty} (\alpha \overline{\rho_2^2})^{2i} \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서  $\alpha \overline{\rho_2^2} \leq 1$ 이므로 간단히 정리하면 다음과 같다.<sup>[4]</sup>

$$T = \frac{\overline{\tau_1 \tau_2} \alpha}{1 - (\alpha \overline{\rho_2^2})^2} \quad (7)$$

또한 식 (7)에서 분자의  $\overline{\rho_2^2}$ 는 일반적인 유리의 경우 약 0.04~0.05 정도로  $\alpha \overline{\rho_2^2} \ll 1$ 이기 때문에 이를 무시하고 식 (5)를 대입하면 투과율  $T$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$T = \overline{\tau_1 \tau_2} \alpha_w^{d/w} \quad (8)$$

마지막으로 위 식을 두께가 서로 다른 여러 장의 필터에 적용을 하면 필터조합 전체의 투과율  $T_{total}$ 을 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>[5]</sup>

$$T_{total}(\lambda) = \overline{\tau_{in} \tau_{out}} \times (\alpha_{w1}^{d1/w1}) \times (\alpha_{w2}^{d2/w2}) \times (\alpha_{w3}^{d3/w3}) \times \dots \quad (9)$$

위와 같은 분광 투과율을 가지는 색필터 조합을 색채계에 적용할 경우 색채계에 사용한 광 검출기의 분광 감응도까지 고려하여 주어야 한다. 색채계에 일반적으로 사용하는 실리콘 광 다이오드의 분광 감응도가  $R_{si}(\lambda)$ 라면 색채계의 분광 감응도  $s(\lambda)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$s(\lambda)_{rel} = T_{total}(\lambda) \times R_{si}(\lambda) \quad (10)$$

이렇게 얻어진 분광 감응도가 특정 등색함수와 일치하는 정도는 CIE에서 제시한 분광 불일치 값(spectral mismatch value)  $f_1'$ 을 가지고 평가할 수 있다.  $f_1'$ 은 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} f_1' &= \frac{\int_0^{\infty} |S^*(\lambda)_{rel} - \overline{t_i}(\lambda)| d\lambda}{\int_0^{\infty} \overline{t_i}(\lambda) d\lambda} \times 100\% \\ S^*(\lambda)_{rel} &= \frac{\int_0^{\infty} S(\lambda)_m \overline{t_i}(\lambda) d\lambda}{\int_0^{\infty} S(\lambda)_m s(\lambda)_{rel} d\lambda} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서  $s^*(\lambda)_{rel}$ 은 규격화된 상대 분광 감응도이고  $\overline{t_i}$ 는 실현시키려고 하는 등색 함수 중 하나이며  $S(\lambda)_m$ 은 CIE 표준 광원의 분광분포로 광 측정(photometry)에서는 A-표준광원(illuminant A)를 사용하지만 색채측정(colorimetry)에서는 보통 상관색온도가 6500 K인 D<sub>65</sub> 표준 광원을 사용한다. 또한 등색함수 필터는 식 (1)의 삼차곡치 정의에 따라 표준광원에 대한 보정계수로도 평가할 수 있다. 본 논문에서는  $\overline{x}$ 를  $\overline{x_1}$ 과  $\overline{x_2}$ 로 나누어 설계를 하였으므로 식 (1)을 아래의 식 (12)과 같이 바꾸어 각 등색함수 필터에 대한 보정계수 ( $k_{x1}, k_{x2}, k_y, k_z$ )를 구한다.

$$\begin{aligned} X_1 &= K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \overline{x_1}(\lambda) d\lambda = k_{x1} \int_0^{\infty} P(\lambda) s_{x1}(\lambda) d\lambda \\ X_2 &= K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \overline{x_2}(\lambda) d\lambda = k_{x2} \int_0^{\infty} P(\lambda) s_{x2}(\lambda) d\lambda \\ Y &= K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \overline{y}(\lambda) d\lambda = k_y \int_0^{\infty} P(\lambda) s_y(\lambda) d\lambda \\ Z &= K_m \int_0^{\infty} P(\lambda) \overline{z}(\lambda) d\lambda = k_z \int_0^{\infty} P(\lambda) s_z(\lambda) d\lambda \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 보정에 사용된 광원의 분광 복사휘도  $P(\lambda)$ 는 D<sub>65</sub>

표준광원을 사용하였고, 각 등색함수 필터의 보정계수는 다음과 같다.<sup>[1,6]</sup>

$$k_{x1} = \frac{683 \int_0^\infty P(\lambda) \bar{x}_1(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) s_{x1}(\lambda) d\lambda} \quad (13)$$

$$k_{x2} = \frac{683 \int_0^\infty P(\lambda) \bar{x}_2(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) s_{x2}(\lambda) d\lambda}$$

$$k_y = \frac{683 \int_0^\infty P(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) s_y(\lambda) d\lambda}$$

$$k_z = \frac{683 \int_0^\infty P(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int_0^\infty P(\lambda) s_z(\lambda) d\lambda}$$

### III. 설계 및 제작

#### 3.1. 설계 프로그램 개발

설계 프로그램의 임무는 다양한 분광 투과율과 두께를 가지는 색필터를 사용하여 등색함수 필터를 적용한 색체계의 분광 감응도가 등색함수의 분광 분포와 일치 하도록 만드는 조합을 찾는 것이다. 프로그램의 기본 알고리즘은 몇 가지 선택된 색필터의 분광 투과율과 두께에 대하여 식 (9)에 따라 전체 투과율을 계산하고 식 (10)에 의해 등색함수 필터를 장착한 색체계의 분광 감응도를 계산하여 식 (11)에 의해 조합된 등색함수 필터의  $f_i'$  값을 얻는다. 이렇게 얻어진  $f_i'$  값은 각 색필터의 두께를 곡선 맞춤변수로 하여 비선형 최소 제곱근 방법으로 최소값을 만들어 주고 이 때의 각 색필터 두께가 결과로 산출된다.

그림 3은 프로그램의 사용자 화면으로 왼쪽에는 선택할 수 있는 색필터의 종류와 분광 투과율 곡선을 보여주고 오른쪽에는 최적화 알고리즘 적용 후 결과 데이터를 보여 준다. 이 프로그램에는 제작사 Schott(독일), Optima(독일), Hoya(독일)에서 상용화하여 판매하고 있는 필터들을 사용했으며, 필터 종류에 따른 분광 투과율 데이터는 일단 제조사가 제공하는 제원(specification)에서 얻었다. 또한 프로그램은 등색함수 ( $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{y}, \bar{z}$ )와  $D_{65}$  표준광원의 복사휘도 및 실리콘 광다이오드의 분광 감응도를 기본 입력데이터로 저장하고 있다. 사용자는 조합하기를 원하는 색필터 종류를 지정하여 선택할 수 있고, 실리콘 광다이오드 없이 등색함수 필터만을 고려할 수도 있으며, 경우에 따라 최적화 함수를  $f_i'$  값이 아닌 두 곡선이 이루는 면적 차의 제곱을 최소로 하여 최적화 할 수 있는 기능도 가능하다.

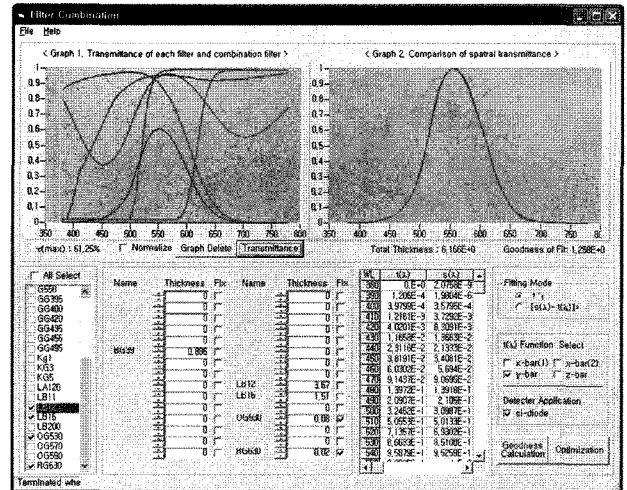


Fig. 3. Screen shot of color matching filters design program.

#### 3.2. 등색함수 필터 설계 결과

각 등색함수 필터의 설계는  $f_i'$  값이 3% 이하로 되는 것을 목표로 하였고 분광 투과율이 정해진 현재 상용화 되어 있는 색필터만을 가지고 설계하는 데 있어 각 색필터의 두께가 너무 얇아 가공이 어렵거나 너무 두꺼워 손실이 많아지지 않도록 주의하였다. 앞에서 언급한 세 제조사의 색필터 30개를 선별하여 프로그램에 적용하였으며, 쉬운 가공을 위하여 두께는 최소  $1 \times 10^{-1}$  mm 이상으로 정하였으나 등색함수 필터 설계에 영향을 많이 미치는 색필터는  $1 \times 10^{-2}$  mm 까지도 허용하였다. 광학적 손실을 줄이기 위해 조합 개수를 5개 이하로 하였고 조합한 필터의 총 두께는 15 mm 이하로 제한하였다. 등색함수 필터 설계의 결과는 표 1에 정리하였다. 표 1에는 미국의 G. Eppeldauer 등이 설계한 결과<sup>[6]</sup>도 함께 정리하였는데 본 연구에서 설계한 등색함수 필터가 사용한 색필터의 개수나  $f_i'$  값( $\bar{x}_2$  제외) 및 최대 투과율에서 우수한 것을 알 수 있다.

#### 3.3. $\bar{y}$ -등색함수 필터 제작을 통한 실험적 검증

프로그램을 사용한 설계에서는 제작사가 제공한 분광 투과율 제원으로부터 계산하였기 때문에 실제 등색함수 필터를 제작할 경우 다음 두 가지를 더 고려해야 한다. 첫째는 사용된 단일 색 필터들의 실제 분광 투과율이 제원에 나타난 값과 얼마나 일치하는가 하는 것과, 둘째로 이론에서처럼 두께를 가공하고 조합한 등색함수 필터의 분광 감응도가 프로그램에서 계산된 것과 같은가 하는 것이다. 이 두 가지를 고려하며 설계 결과의 신뢰성을 검증하기 위하여 색필터 3장으로 구성된  $\bar{y}$ -필터를 설계하여 제작하여 보았다.

먼저 제... 제공한 색필터 분광 투과도를 사용한 초기 설계... (ign)의 결과를 표 2의 두번째 열에 나타내었다. 그... 기 설계에서 사용한 색필터의 분광 투과율을 분광광도계... (arian, Cary5000 spectro-photometer)로 측정된 결과 그림 4와 같이 서로 일치하지 않는 것을 확인하였다.

Table 1. Designed results of the color matching function filters and its comparison with the other study.

Current study	Color matching function	$\bar{x}_1$	$\bar{x}_2$	$\bar{y}$	$\bar{z}$
	Color matching filter combination [thickness (mm) / model]		2.67 /BG25	1.15 /BG39	0.9 /BG39
		1.7 /BG42	5.0 /OG530	3.5 /LB12	1.2 /BG25
		4.7 /GG400	0.27 /OG590	1.6 /LB16	0.3 /GG435
		0.56 /GG435	0.17 /RG630	0.07 /OG530	2.5 /LB120
		2.9 /KG5		0.03 /RG630	3.8 /LB200
Total thickness (mm)	12.53	6.59	6.10	12.70	
$f_i'$	1.45%	2.38%	1.30%	2.90%	
$\tau_{max}$	30.52%	29.53%	59.07%	3.44%	
G. Eppeldauer <sup>[6]</sup>	Number of glass filter sheet	5	6	6	8
	Total thickness (mm)	9.716	8.817	4.643	9.868
	$f_i'$	3.83%	1.55%	1.47%	3.31%
	$\tau_{max}$	3.41%	8.15%	38.04%	1.65%

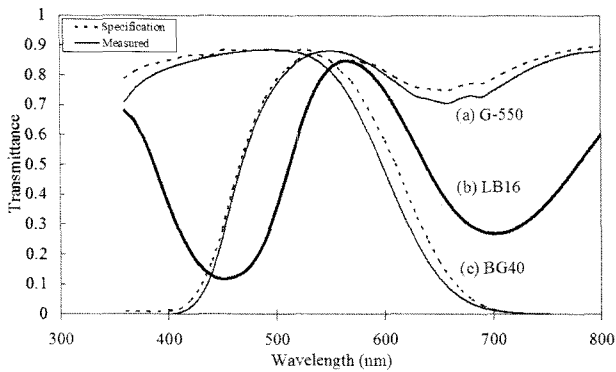


Fig. 4. Comparison of transmittance of specification with measured value.

이 그림에서 보면 각 색필터들의 제원과 측정값이 완전히 일치하지는 않지만 곡선 분포를 유지한 채 위 아래로 약간씩 끌린 것을 볼 수 있고 이 현상으로 인해  $\bar{y}$ -필터의  $f_i'$  값이 3.12%로 늘어났다. 따라서 투과율의 차이가 가장 심한 색필터 BG40 대신 거의 비슷한 분광 분포를 가지는 다른 색필터들의 분광 투과율을 측정하여 그 데이터를 프로그램에 입력 후 재설계를 수행하였다. 이렇게 분광 투과율 측정결과에 따라 수정한 설계(modified design) 결과는 표 2의 세번째 열에 나타내었다. 따라서 초기 설계는 등색함수 필터를 제작하는데 사용할 색필터를 선택하는 데에 유용하지만 정확한 측정을 통한 분광 투과율 데이터의 반영은 정확한 설계를 위하여 꼭 필요함을 알 수 있다.

마지막으로 실제 제작한 등색함수 필터의 품질이 프로그램으로 설계한 결과와 얼마나 일치하는지 알기 위하여 결과물인  $\bar{y}$ -필터를 실리콘 광다이오드와 조합하여 분광 감응도를 측정하여 보았다. 그림 5는 측정된 규격 분광 감응도(실선)와 CIE에 의해 정의된 등색함수(긴 파선)를 같이 보여주고 그 차이를 짧은 파선으로 나타내었다. 이 차이로부터 계산한

Table 2. Comparison of the design with the realization of the  $\bar{y}$ -filter using 3 sheets of color glass.

Color matching filter $\bar{y}$	Initial design	modified design	Realized
Color matching filter combination (thickness / model name)	1.9 / BG40	0.71±0.02 / BG39	0.71
	1.0 / G-550	1.0±0.1	1.0
	2.1 / LB16	2.1±0.1	2.1
Total thickness (mm)	5.0	3.81	3.81
$f_i'$	2.47%	2.83%	2.86%
$\tau_{max}$	70.63%	74.17%	73.18%

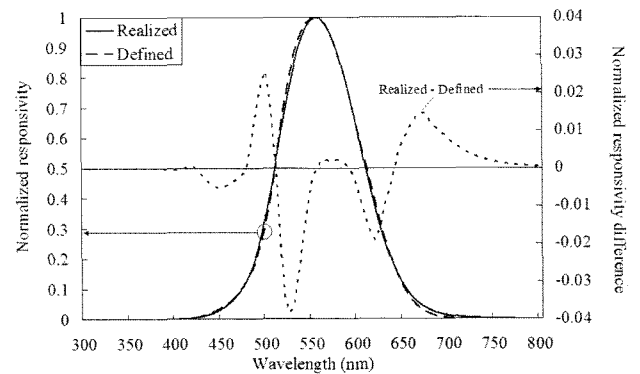


Fig. 5. Spectral responsivity differences of the realized and defined values of the color matching function  $\bar{y}$ .

$f_i'$  값은 2.86%로 설계 프로그램에서 예측한 2.83%와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 측정 결과는 표 2의 마지막 열에 정리하였다. 결론적으로 우리가 개발한 설계 프로그램은 사용 색필터의 정확한 분광투과율 데이터만 입력하여 주면 실제 측정과 매우 잘 일치하는 결과를 제공하는 것으로 검증하였다.

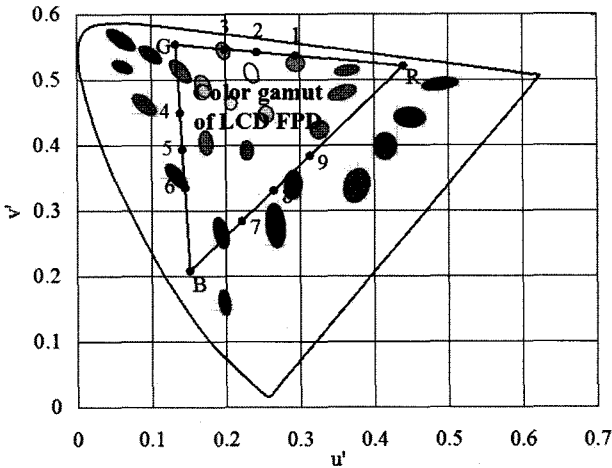


Fig. 6. The color gamut of LCD flat panel display in the  $L^*u^*v^*$  chromaticity diagram (CIE 1976).

#### IV. LCD 디스플레이에 대한 색차 분석

위와 같은 과정을 통하여 설계 제작한 등색함수 필터 색채계를 여러 종류의 광원에 대하여 적용할 경우 발생하는 계통오차에 대하여 알아본다. 설계한 등색함수 필터의  $f_i'$  값이 표 1과 같이  $\bar{x}_1 = 1.45\%$ ,  $\bar{x}_2 = 2.38\%$ ,  $\bar{y} = 1.3\%$ ,  $\bar{z} = 2.9\%$ 로 각각에 대해서 좋은 결과를 얻었지만 표준광원이 아닌 임의의 광원에 대해 측정할 경우 측정 불확도는 달라질 뿐만 아니라 식 (2)에서처럼  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$  필터에 의해 측정된 각각의 삼차극치들은 서로 수학적 연산을 통해 색좌표를 계산해야 하기 때문에 색채 측정에 있어서는  $f_i'$  값이 측정 불확도의 절대적인 기준으로 볼 수 없다. 표 1의 결과에 따른 색채계의 분광 감응도를 먼저  $D_{65}$  표준광원으로 색보정을 해주면 식 (12)와 식 (13)에 따라 보정계수  $k_{x1}=237.404$ ,  $k_{x2}=732.006$ ,  $k_y=684.995$ ,  $k_z=1234.428$ 를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 서로 다른 색을 가진 광원들에 대한 색차(color difference)를 구하지 않고 하나의 LCD 평면 디스플레이(Sony, SDM-X82/HQ1)의 색역이 구성하는 삼각형에서 꼭지점인 red, green, blue (RGB)와 그 사이의 세 지점 등 총 12지점에 대해 등색함수 필터의 색차를 분석하여 보았다. 다음 그림 6은  $L^*u^*v^*$  색좌표(CIE, 1960)에서 LCD 광원의 색역과 측정을 하고자 하는 12 지점을 표시한 것이다. 여기서 25개의 타원은 MacAdam 타원으로 한 타원 안의 색은 사람의 눈으로 볼 때 같은 색으로 인지하게 되는 영역을 말한다.

$D_{65}$  표준광원으로 색보정까지 마친 등색함수 필터 색채계를 가지고 측정하고자 하는 LCD 광원의 RGB의 9지점을 계산하고 CIE 등색함수에 의해 계산된 값과 차이를 계산하면 그림 7과 같은 결과를 얻게 된다. 그래프의 횡축은 각 측정 지점에서의 색차 값을 나타내는 것으로 그림 6에서 MacAdam 타원의 단축 중 가장 짧은 것이  $L^*u^*v^*$  색좌표에서 약 0.1 정도가 되는 것을 볼 때 등색함수 필터에 의해 측정되는

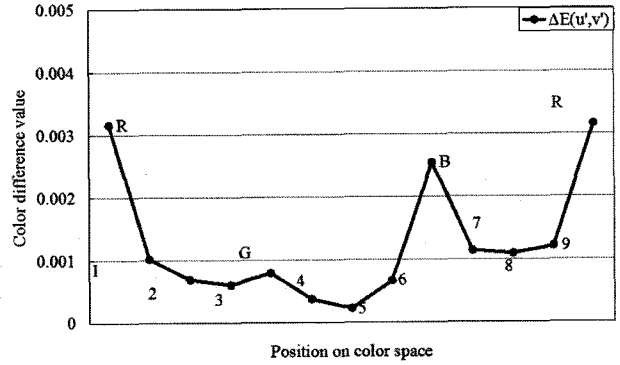


Fig. 7. Systematic error of a LCD flat panel display color measurement using the designed color marching function filters.

색차는 사람의 눈으로 구별하지 못하는 영역에서의 차이는 것을 알 수 있다. 그리고 그림 7의 그래프 추세를 보면 색차가 LCD 광원의 green 영역에서 가장 적은 것을 볼 수 있는데 이것은 사람이 green에 가장 민감하므로 본 연구에서 설계한 등색 함수 필터가 잘 설계된 것을 알 수 있다.

#### V. 결 론

본 연구에서는 색채 측정 장치에 핵심이 되는 등색함수 필터를 제작하기 위해 사용 색필터를 조합하여 등색함수 필터를 설계하는 프로그램을 개발하였다. 그 결과 CIE에서 정의한 세 가지 등색함수 모두에 대해  $f_i'$  값이 3% 이하가 되는 고품질의 등색함수 필터를 설계하는데 성공하였고, 색필터 3장의 조합으로 설계한  $\bar{y}$ -필터를 시범적으로 제작한 결과 정확한 색필터의 분광 투과율만 입력한다면 우리가 개발한 프로그램으로 설계한 필터의  $f_i'$  예측 값이 실제 측정값과 0.03% 이내로 일치하는 것을 검증하였다. 이 논문에서는 프로그램의 신뢰성을 입증하기 위해  $\bar{y}$ -필터 한 종류에 대해서만 제작하였지만  $\bar{x}$ -필터와  $\bar{z}$ -필터에 대해서도 단일 색필터에 대한 정확한 분광 투과율만 측정한다면 동일한 수준의 설계와 제작이 가능할 것으로 판단한다.

또한 본 연구에서는 설계한 색채계를 사용하여 LCD 평면 디스플레이의 색역에 분포한 각기 다른 색을 측정할 때 등색함수에 의해 계산된 색과의 색차를 분석한 결과 사람의 눈으로 구별하지 못하는 범위 내에 드는 것을 확인하였다. 앞으로 이러한 설계를 바탕으로 성능이 우수한 색채계에 사용할 수 있는 등색함수 필터를 실제 제작하여 평가, 보급할 계획이다.

#### 참고문헌

- [1] Casimer DeCusatis, "Handbook of Applied Photometry," Springer-Verlag, New York, pp. 386-390, 1996.
- [2] Daniel Malacara, "Color vision and Colorimetry," SPIE,

- pp. 31-35, pp. 57-67, 2002.
- [3] Roy S. Berns, "Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology," 3<sup>rd</sup> edition, John Wiley & Sons, 2000 ; 조맹섭, 김창순, 강병호, 김동호 역, "색채학원론", 시그마프레스, 2003.
- [4] William Ross McCluney, "Introduction to Radiometry and Photometry," Artech House, pp. 148-154, 1994.
- [5] 이인원, "ECR에 의한 복사도의 국가표준확립 연구 (KSRI-86-13-IR)", 한국표준연구소, pp. 66-75, 1986.
- [6] George P. Eppeldauer and Miklós Rácz, "Design and characterization of a photometer-colorimeter standard," Applied Optics, Vol. 43, No. 13, pp. 2621-2631, 2004.

## Design of Color Matching Filters and Error Analysis in Colorimetric Measurement of LCD Flat Panel Display Using the Filters

Ji-Ho Jeon and Jae Heung Jo

*Dept. of Applied Optics and Electromagnetics, Hannam University, Ojung-dong 133, Daejeon 306-791, KOREA*

Seung-Nam Park<sup>†</sup>, Chul-Woung Park, Dong-Hoon Lee, and Ki-Lyong Jung

*Division of Physical Metrology, Korea Research Institute of Standards and Science, 1 Doryong-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon 305-340, KOREA*

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

(Received November 29, 2006, Revised manuscript November 29, 2006)

Filter colorimeters have a set of spectral bands for which spectral responsivity is the same as the color matching function defined by CIE (Commission Internationale de l'Eclairage). We have designed a set of color matching function filters denoted by  $\bar{x}$ -filter,  $\bar{y}$ -filter, and  $\bar{z}$ -filter. Because the  $\bar{x}$ -function has two transmission bands, two  $\bar{x}$ -filters are designed to cover the  $\bar{x}$ -function. To design the filters, we developed a nonlinear least square fit program which determines the thickness of the color glasses by minimizing its spectral mismatch value ( $f_i'$ ) to below 3 %. The design has been validated by fabrication of the  $\bar{y}$ -bar filter, of which  $f_i'$  was measured to be 2.8 %. Considering a LCD flat panel display as a device under test, we have calculated the systematic error of the colorimetric measurement using the designed filters.

OCIS code : 040.5160, 120.2240, 120.5240, 330.1730.