

표준 색공간을 이용한 비표준 디스플레이의 색 보정 방법

김은수*

¹선문대학교 전자공학과

Color Correction Method of Non-standard Display Using Standard Color Space

Eun-Su Kim^{1*}

¹Department of Electronic Engineering, Sunmoon University

요약 색 정보 전달의 호환성을 위해 채택된 sRGB 색공간은 수많은 컴퓨터 시스템 및 주변 멀티미디어 장치들에 효율적인 색 정보 전달을 가능하게 한 표준이다. 하지만 현재 우리가 일반적으로 사용하고 있는 디스플레이 모니터는 sRGB의 표준과 다른 비 표준 삼원색과 감마 특성을 가지고 있다. 본 논문에서는 비표준 디스플레이를 sRGB 표준의 화상 색에 좀 더 가까운 색을 재현하기 위한 오차 보정 행렬을 제안한다. 제안한 색도 오차 보정 행렬을 이용한 방법을 적용한 실험 결과, 비 표준 디스플레이에 재현된 영상에서의 색 재현 오차가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Abstract A standard default color space, sRGB, provides compatibility for the transmission of color within the Internet color operating systems and device drivers. However, a display monitor we use generally have non-standard primaries and gamma characteristic different from those specified by sRGB. In this paper, correction methods of chromatic error for a non-standard display monitor are proposed. Experimental results show that the proposed method using the correction matrix reduced chromatic errors at in compared with the non-corrected image's on a non-standard display.

Key Words : Color Reproduction, Color Correction, Color Space, Standard Display

1. 서론

컴퓨터의 발달은 인터넷 환경의 급속한 발전과 더불어 새롭고 다양한 신종 정보사업을 계속 만들어 내고 있으며, 컴퓨터와 인터넷 환경에 익숙하지 않은 일반 사용자들도 많은 정보에 쉽게 접근할 수 있는 기회를 제공하고 있다. 인터넷 환경의 다양한 정보는 대부분 시각 정보이며, 상당부분이 색과 관련된 정보이다. 또한 이 시각 정보를 접하는데 있어 대표적 단말기기는 디스플레이 시스템이다.

한편 컴퓨터 산업의 정보 공유에 있어 가장 중요한 것

은 사용자 또는 기기 간의 정보 처리 상호 운용 가능성과 호환성이라 할 수 있다. 색 정보 전달의 호환성을 위해 채택된 sRGB(standard RGB) 색공간(color space)은 수많은 컴퓨터 시스템 및 주변 멀티미디어 장치들에 적용되고 있는 다양한 색공간들 사이에 단일 RGB 색공간으로써 효율적인 색 정보 전달을 가능하게 한 표준이다 [1,2]. 따라서 이러한 sRGB 표준에 근거하여 원 화상의 색 정보를 sRGB 표준 디스플레이 시스템에 그대로 재현한다면 원 화상과 동일한 색을 얻을 수 있을 것이다.

그러나 실제적인 디스플레이의 밝기 재현 한계, 인광체와 기준 백색의 차이, 감마 특성의 차이, 주변 환경 및

본 논문은 2013학년도 선문대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : Eun-Su Kim(Sunmoon Univ.)

Tel: +82-41-530-2386 email: EunSu.KIM@sunmoon.ac.kr

Received September 5, 2014

Revised November 20, 2014

Accepted March 12, 2015

Published March 31, 2015

인간 시각 특성 등으로 인해 디스플레이 상에 원 화상과 같은 색을 재현 하는 것은 불가능하다. 그러므로 디스플레이의 색 재현 성능은 재현 화상의 색을 얼마나 더 원 화상의 색에 가깝게 구현할 수 있느냐 하는 것이 주요 관심 사항이 된다.

본 논문에서는 비표준 디스플레이를 sRGB 표준의 화상 색에 좀 더 가까운 색을 재현하기 위한 오차 보정 행렬을 제안한다. 제안된 보정 방법을 적용한 모의 실험 결과, 원 화상의 색에 한층 더 가까운 색이 재현되는 것을 확인하였다. 그리고 본 논문의 결과는 PC 디스플레이뿐만 아니라 일반 TV에도 응용이 가능할 것으로 생각된다.

2. 본론

2.1 디스플레이의 색 재현 방법

원하는 색을 디스플레이 상에 재현하기 위해서는 CIE XYZ 시스템으로부터 디스플레이의 RGB 시스템으로의 변환 방법이 필요하다[3-8]. 그림 1에서와 같이 원 영상의 스펙트럼 분포를 $S(\lambda)$ 라고 했을 때, 그 삼자극치 $X_S, Y_S,$ 및 Z_S 는

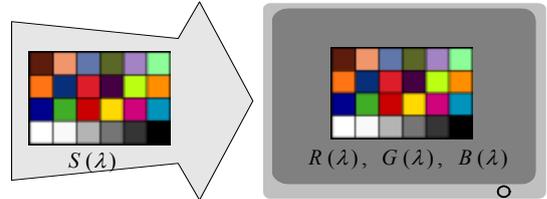
$$\begin{aligned} X_S &= \int S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \\ Y_S &= \int S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \\ Z_S &= \int S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (1)$$

와 같다. 여기서 $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ 는 CIE의 1931 표준 관찰자의 컬러 매칭 함수(color matching function, CMF)를 나타낸다[3-6].

또한 컬러 디스플레이의 RGB 삼원색의 스펙트럼 분포를 각각 $R(\lambda), G(\lambda), B(\lambda)$ 로 두면, 디스플레이상에 재현된 삼원색의 디스플레이 삼자극치 X_d, Y_d, Z_d 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} X_d &= \int [R(\lambda)+G(\lambda)+B(\lambda)] \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ &= X_{Rd} + X_{Gd} + X_{Bd}, \\ Y_d &= \int [R(\lambda)+G(\lambda)+B(\lambda)] \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ &= Y_{Rd} + Y_{Gd} + Y_{Bd}, \\ Z_d &= \int [R(\lambda)+G(\lambda)+B(\lambda)] \bar{z}(\lambda) d\lambda \\ &= Z_{Rd} + Z_{Gd} + Z_{Bd} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $X_{id}, Y_{id},$ 및 Z_{id} ($i = R, G, B$) 는 삼원색의 삼자극치이다.



[Fig. 1] Original image and reproduced image on PC monitor.

위의 식 (1)에 나타낸 원 영상을 식 (2)의 디스플레이에 재현하게 되면 등색조건이 이루어짐으로 다음 식을 만족하게 된다.

$$\begin{aligned} X_S &= X_d = X_{Rd} + X_{Gd} + X_{Bd}, \\ Y_S &= Y_d = Y_{Rd} + Y_{Gd} + Y_{Bd}, \\ Z_S &= Z_d = Z_{Rd} + Z_{Gd} + Z_{Bd}. \end{aligned} \quad (3)$$

그리고, 삼원색 각각의 삼자극치 합을 각각 $T_R, T_G,$ 및 T_B 라고 하면

$$\begin{aligned} T_R &= X_{Rd} + Y_{Rd} + Z_{Rd} \\ T_G &= X_{Gd} + Y_{Gd} + Z_{Gd} \\ T_B &= X_{Bd} + Y_{Bd} + Z_{Bd} \end{aligned} \quad (4)$$

와 같이 되고, 디스플레이의 삼자극치 $X_d, Y_d,$ 및 Z_d 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_d &= x_R T_R + x_G T_G + x_B T_B, \\ Y_d &= y_R T_R + y_G T_G + y_B T_B, \\ Z_d &= z_R T_R + z_G T_G + z_B T_B. \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 x_i, y_i, z_i ($i = R, G, B$) 는 삼원색 좌표이다. 또한 $T_R, T_G,$ 및 T_B 를 디스플레이의 입력신호 $R, G,$ 및 B 로 나타내면

$$\begin{aligned} T_R &= K_{Rd} R \\ T_G &= K_{Gd} G \\ T_B &= K_{Bd} B \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 여기서 K_{Rd}, K_{Gd} 및 K_{Bd} 는 각각의 디스플레이의 RGB 채널 이득(channel gain)에 의해 결정되는 상수이다. 따라서 디스플레이 상에 재현된 삼원색의 디

스플레이 자극치 $X_d, Y_d,$ 및 Z_d 는 각각 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} X_d &= x_R K_{Rd} R + x_G K_{Gd} G + x_B K_{Bd} B \\ Y_d &= y_R K_{Rd} R + y_G K_{Gd} G + y_B K_{Bd} B \\ Z_d &= z_R K_{Rd} R + z_G K_{Gd} G + z_B K_{Bd} B \end{aligned} \quad (7)$$

그리고 식 (7)을 행렬 형태로 표현하면

$$\begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rd} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gd} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bd} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (8)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 등색이 되는 입력신호 RGB 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{Rd} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gd} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bd} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_d \\ Y_d \\ Z_d \end{bmatrix} \quad (9)$$

한편, 식 (7)에서 $R=G=B=1$ 일 때, 즉 RGB 각각의 입력 신호가 100%일 때 기준 백색의 색좌표 (x_w, y_w, z_w) 가 되도록 채널 이득 K_{Rd}, K_{Gd}, K_{Bd} 를 결정하고, 이 때 Y_w 로 정규화 하면 위 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{X_w}{Y_w} &= (x_R K_{Rd} + x_G K_{Gd} + x_B K_{Bd}) \frac{1}{Y_w} \\ &= \frac{X_w}{T} \cdot \frac{T}{Y_w} = \frac{x_w}{y_w}, \\ \frac{Y_w}{Y_w} &= (x_R K_{Rd} + x_G K_{Gd} + x_B K_{Bd}) \frac{1}{Y_w} \\ &= 1, \\ \frac{Z_w}{Y_w} &= (x_R K_{Rd} + x_G K_{Gd} + x_B K_{Bd}) \frac{1}{Y_w} \\ &= \frac{Z_w}{T} \cdot \frac{T}{Y_w} = \frac{z_w}{y_w} \end{aligned} \quad (10)$$

그리고 이를 행렬 형태로 표현하면 다음과 같고,

$$\begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_{Rd} \\ K_{Gd} \\ K_{Bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_w / y_w \\ 1 \\ z_w / y_w \end{bmatrix} \quad (11)$$

식 (11)을 채널이득 K_{Rd}, K_{Gd}, K_{Bd} 로 표현하면 다음

과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} K_{Rd} \\ K_{Gd} \\ K_{Bd} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_w / y_w \\ 1 \\ z_w / y_w \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{y_w} \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서 식 (9)로부터 디스플레이의 입력신호 RGB 는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} K_{Rd} & 0 & 0 \\ 0 & K_{Gd} & 0 \\ 0 & 0 & K_{Bd} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_R & x_G & x_B \\ y_R & y_G & y_B \\ z_R & z_G & z_B \end{bmatrix}^{-1} \quad (14)$$

따라서 디스플레이 상에서 원 화상과 동일한 색을 재현하기 위해서는 원 화상과 동일한 색 자극치를 디스플레이 상에 재현하면 된다. 그러므로 원 화상의 자극치 XYZ 로부터 디스플레이 인광체의 각 좌표 값과 채널 이득으로 이루어진 변환 행렬 \mathbf{M} 을 이용하여 등색 재현을 위한 입력신호 RGB 를 구함으로써 원 화상의 색과 동일한 색을 재현할 수 있다[3-7].

2.2 sRGB 색공간의 정의

sRGB 색공간은 현재 공존하고 있는 수 많은 색공간들을 명백하고 효율적인 하나의 단일 색공간으로 표현하고자 제안된 인터넷 환경을 위한 표준 색공간이다[1,2]. sRGB의 장점은 색 정보 전달에 있어 저 비용, 계산의 효율성, 최종 사용자들에게 투명성 제공, 그리고 무엇보다도 간단하게 색 정보를 처리할 수 있다는 것이다.

단일 sRGB 표준 색공간에서 제안된 표준은 두 부분이 있다. 하나는 인간 시각계에 영향을 주는 기준 시 환경에 대한 정의이고, 다른 하나는 표준 장치계의 측색적 정의와 변환들이다. 시 환경은 표준과 대상 시 환경 간의 변환을 위해 필요한 정보를 제공하는 것이고, 측색적 정의는 sRGB 색공간과 CIE XYZ 2° 관찰자 색공간 간의 변환을 위해 필요한 정보를 제공한다.

sRGB 기준 시 환경은 표 1에서와 같이 실제 디스플레이를 볼 때의 조건과 유사하다. 여기서, 휘도 레벨은 실제

디스플레이의 휘도를 나타내고, 조명 백색의 색도는 CIE D₆₅ 표준 광원과 같다. 영상 주변의 반사율을 20%로 정의하고 있고, 이는 단순히 계산하면 디스플레이 기준 백색의 최대 밝기에 대해 CIELAB의 L* 값으로 50에 가깝다. 예를 들면 이 주변 조건은 인쇄물과 배경에 동일한 광원이 균일하게 조사되고 있을 때 비 선택적 스펙트럼 분포를 갖는 약 20%의 반사율을 가진 회색 반사 인쇄물과 유사하다.

부호화 주변 조도 레벨은 평균 실외 조도보다 낮은 다소 어두운(dim) 시 환경으로, 통상적인 주변 조도의 1/3인 64 lux로 규정하고 있다. 부호화 시의 주변 백색 점의 색도는 CIE D₆₀ 과 같으며, 부호화 viewing flare는 주변 조명에 의해 디스플레이 표면에 반사되어 인지되는 밝기로서 주변 조명 최대 백색 밝기의 1.0%로 규정하고 있다.

실제 주변 조도 레벨은 통상적인 사무실 시 환경으로서 평균 실외 조도 보다 낮은 200 lux로 규정하고 있으며, 실제 주변 백색 점의 색도는 CIE D₆₀과 같고, 실제 viewing flare는 통상적인 주변 조명에 의해 디스플레이 표면에 반사되어 인지되는 밝기로서 주변 조명의 최대 백색 조도의 5.0 %로 규정하고 있다.

기준 시 환경의 조합으로 sRGB는 간단한 변환을 통해 표준 CIE XYZ값으로 정의 될 수 있다. CIE XYZ 자극치를 계산하기 위해 지정된 장치에 대한 스펙트럼의 감도 조정과 시 환경의 정의가 필요하다. 표 2에 sRGB 표준 삼원색과 같으며, 현재 HDTV의 표준으로 사용중인 ITU-R BT.709[9] 기준 삼원색과 표준광원 D₆₅에 대한 색도를 나타내었다.

D₆₅ 표준광에 의해 조명이 된 sRGB의 R_{sRGB}, G_{sRGB}, 및 B_{sRGB} 는 앞의 식 (8)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

[Table 1] sRGB viewing environment parameters.

Condition	sRGB
Luminance level	80 cd/m ²
Illuminant white	D65
Image surround	20% reflectance
Encoding ambient illuminance level	64 lux
Encoding white point	D50
Encoding viewing flare	1.0%
Typical ambient illuminance level	200 lux
Typical white point	D50
Typical viewing flare	5.0%

[Table 2] CIE chromaticities for ITU-R BT.709 reference primaries and CIE standard illuminant.

	R	G	B	standard illuminant, D ₆₅
x	0.6400	0.3000	0.1500	0.3127
y	0.3300	0.6000	0.0600	0.3290
z	0.0300	0.1000	0.7900	0.3583

$$\begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (15)$$

그리고 R_{sRGB}, G_{sRGB}, 및 B_{sRGB} 값으로부터 삼자극치 XYZ로의 변환은 식 (9)로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = M_{sRGB} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_{sRGB} \\ G_{sRGB} \\ B_{sRGB} \end{bmatrix} \quad (16)$$

여기서, M_{sRGB} 는 표 2의 sRGB 표준 인광체와 기준 백색 D₆₅에 의해 주어진 변환 행렬이다.

2.3 비표준 디스플레이의 색도 오차 보정

sRGB 표준에 따라 주어진 원 화상을 sRGB 표준 디스플레이에 재현 한다면 원 화상과 동일한 재현 색을 얻게 될 것이다. 그러나 현재 우리가 일반적으로 사용하고 있는 디스플레이는 sRGB 표준과 다른 인광체 및 기준 백색의 색도를 지니고 있는 비표준 디스플레이이므로, 재현 화상의 색도 오차가 필히 발생하게 된다. 또한 비표준 디스플레이의 감마 특성은 이상적인 표준 감마인 2.2와 차이가 있고, 각 제조사에 따라서도 그 특성의 차이가 있어 재현 화상의 색도 오차를 더욱 크게 만든다. 이러한 비표준 디스플레이에서의 색도 오차를 줄이면 좀 더 원 화상에 가까운 색 재현 특성을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안하는 색도 오차 보정 방법은 다음과 같다.

표준 디스플레이에 대한 기준 백색과 인광체 좌표가 주어질 때 주어진 원 화상의 색 자극치 XYZ로부터 전압 신호 RGB로의 변환 관계식은 식 (13)으로부터 다음과 같은 행렬식으로 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{M}_S \cdot \mathbf{T}_S \quad (17)$$

여기서 \mathbf{V}_S 는 원 화상의 RGB 각각의 전압신호 행렬이고, \mathbf{M}_S 는 표준 인광체 좌표 값과 기준 백색의 좌표 값에 의해 결정되는 행렬이며, \mathbf{T}_S 는 원 화상의 XYZ 삼자극치 행렬이다.

이와 유사하게 인광체 좌표 값과 설정된 기준 백색의 좌표 값이 주어질 때, 전압 신호 RGB로부터 색 자극치 XYZ로의 변환 관계는 식 (13)과 표준 입력 신호와 디스플레이에서 재현 되는 신호가 같아져야 한다는 관계 ($\mathbf{V}_D = \mathbf{V}_S$)에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_D &= \mathbf{M}_D^{-1} \cdot \mathbf{V}_D \\ &= \mathbf{M}_D^{-1} \cdot \mathbf{V}_S \\ &= \mathbf{M}_D^{-1} \cdot \mathbf{M}_S \cdot \mathbf{T}_S \end{aligned} \quad (18)$$

여기서 \mathbf{T}_D 는 디스플레이 상에 재현된 화상의 XYZ 삼자극치 행렬이고, \mathbf{M}_D 는 디스플레이의 인광체 좌표 값과 설정된 기준 백색의 좌표 값에 의해 결정되는 행렬이며, \mathbf{V}_D 는 디스플레이의 입력 전압 신호인 RGB 삼자극치 행렬이다.

한편 디스플레이 상에 재현된 화상이 원 화상과 측색적으로 동일하게 되기 위해서는 색 자극치가 같아야 한다. 즉 $\mathbf{T}_D = \mathbf{T}_S$ 의 조건을 만족하여야 한다. 그러나 표준과 다른 인광체 및 기준 백색의 색도를 사용하는 비표준 디스플레이의 변환 행렬 \mathbf{M}_D 는 sRGB 표준 변환 행렬 \mathbf{M}_S 와 서로 다르므로 상기의 조건을 만족할 수 없다. 따라서 재현 화상과 원 화상의 색 자극치가 동일하게 되도록 오차 보정 행렬 \mathbf{M}_C 를 도입하면 다음의 식이 성립된다.

$$\mathbf{M}_C = \mathbf{M}_D \cdot \mathbf{M}_S^{-1} \quad (19)$$

그러므로 디스플레이에서 색 재현시 원 화상과 동일한 색도 좌표를 얻기 위한 보정 행렬 \mathbf{M}_C 로부터 각각의 입력 전압 신호에 대하여 회로적으로 보정을 수행함으로써 색 재현 오차를 저감시킬 수 있을 것이다.

2.4 실험 및 고찰

제안된 오차 보정 행렬을 적용한 색도 오차 보정 방법의 검증을 위해 모의실험을 실시하였다. 실험에 사용된

디스플레이는 CPD-G500(SONY)모델로 표 3에 나타난 것과 같은 인광체 및 기준 백색 좌표를 가진다. 이를 표준 색 영역과 비교하여 그림 2에 RGB 삼원색과 기준 백색의 좌표를 나타내었다. 그리고 실험에 적용된 다른 설정 사항은 다음과 같다.

- 디스플레이 최대 백색 밝기: 80 cd/m² (sRGB 기준 환경으로 설정)
- 디스플레이 감마 값: 2.2
- 색도 측정 장비: CRT Color Analyzer, CA-100 (Minolta)
- 시험 색: Macbeth color checker
- 시험 패치 (patch)의 크기: 100×100 mm²
- 실험 장소: 1 lux 이하의 암실

CPD-G500 디스플레이의 채널 이득은 표 3의 기준 백색과 디스플레이의 인광체 좌표를 이용하여 식 (12)로부터 구하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{Ra} \\ K_{Gd} \\ K_{Bd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.7668 \\ 1.1248 \\ 1.1479 \end{bmatrix} \quad (20)$$

따라서 이를 식 (13)에 대입하여 구한 CPD-G500 디스플레이의 변환 행렬 \mathbf{M}_D 는

$$\mathbf{M}_D = \begin{bmatrix} 2.7598 & -1.1817 & -0.4053 \\ -1.0639 & 1.9772 & 0.0312 \\ 0.0701 & -0.2770 & 1.1114 \end{bmatrix} \quad (21)$$

와같이 주어진다.

sRGB 표준 화상에 대한 변환 행렬 \mathbf{M}_S 는 식 (16)의 \mathbf{M}_{sRGB} 의 역 행렬과 같고, 앞서 구한 식 (20) 및 (21)로부터 CPD-G500 디스플레이에 대한 색도 오차 보정 행렬 \mathbf{M}_C 는 다음과 같이 결정되게 된다.

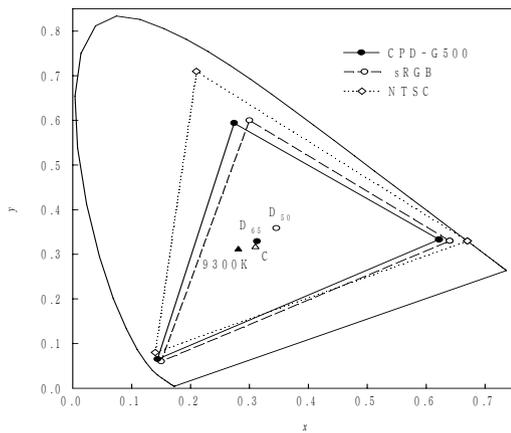
$$\begin{aligned} \mathbf{M}_C &= \mathbf{M}_D \cdot \mathbf{M}_S^{-1} \\ &= \mathbf{M}_D \cdot \mathbf{M}_{sRGB} \\ &= \begin{bmatrix} 0.8790 & 0.0935 & 0.0275 \\ -0.0177 & 1.0373 & -0.0196 \\ -0.0085 & -0.0405 & 1.0490 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

상기의 변환 행렬과 오차 보정 행렬로써 그림 1에 나타난 Macbeth color checker[10]의 각 시험 색에 대해 감마를 고려한 비선형 RGB 입력 값을 구하고, 이로부터 각

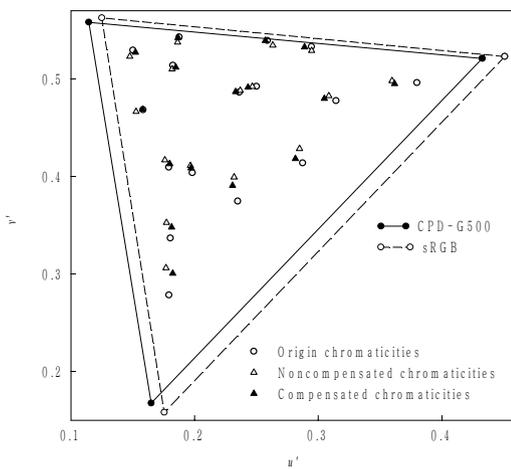
시험 색에 대한 시험 패치를 만들어 보정 전후의 색도 좌표를 비교 측정하였다.

[Table 3] CIE chromaticities of primaries and reference white in CPD-G500 CRT monitor.

	R	G	B	Reference white
x	0.622	0.274	0.144	0.313
y	0.334	0.595	0.065	0.329
z	0.044	0.131	0.791	0.358



[Fig. 2] Chromaticities of primaries and reference whites of sRGB, NTSC and CPD-G500 monitor.



[Fig. 3] Chromaticity compensation effects for Macbeth test colors in the CPD-G500 monitor using the error correction matrix on the CIE 1976 $u'v'$.

그 결과는 그림 3에서와 같고, 보정 전보다 보정 후의 좌표가 원 화상의 좌표에 더 가까이 근접한 것을 확인하였다. 이를 $u'v'$ 좌표계에서 색도 오차 $\Delta E_{u'v'}$ 값으로 비교하면 표 4에서와 같이 평균 0.003이 감소되어, 보정 후 약 30% 정도의 색도 오차 개선 효과를 보임을 확인하였다.

[Table 4] Results for Macbeth test colors in the CPD-G500 monitor using the CIE 1976 $u'v'$.

No.	Macbeth test colors	Original color		Noncompensated color		Compensated color		Compensation effect $\Delta E_{u'v'} (\times 10^{-3})$
		u'	v'	u'	v'	u'	v'	
1	Dark skin	.250	.492	.247	.492	.243	.491	3.6
2	Light skin	.236	.486	.237	.488	.233	.487	0.9
3	Blue sky	.179	.409	.176	.417	.180	.413	4.5
4	Foliage	.182	.514	.182	.510	.185	.512	0.6
5	Blue flower	.198	.404	.197	.411	.197	.409	2.5
6	Bluish green	.158	.468	.153	.466	.158	.469	5.3
7	Orange	.295	.533	.295	.529	.289	.533	1.7
8	Purplish blue	.180	.337	.177	.353	.181	.348	4.9
9	Moderate red	.314	.478	.308	.483	.305	.480	2.0
10	Purple	.235	.375	.232	.399	.231	.391	8.3
11	Yellow green	.187	.543	.186	.538	.187	.542	4.4
12	Orange yellow	.259	.539	.263	.534	.257	.539	4.9
13	Blue	.179	.278	.177	.306	.182	.300	5.6
14	Green	.150	.529	.148	.523	.152	.527	3.9
15	Red	.380	.496	.360	.498	.362	.495	2.2
16	Yellow	.231	.546	.236	.541	.230	.546	5.5
17	Magenta	.287	.414	.285	.428	.281	.418	7.6
18	Cyan	.139	.403	.135	.407	.143	.404	1.8
Average $\Delta E_{u'v'} (\times 10^{-3})$		-		9.9		6.9		3.0

3. 결론

본 논문에서는 비표준 디스플레이를 sRGB 표준의 화상 색에 좀 더 가까운 색을 재현하기 위한 오차 보정 행렬(correction matrix)을 제안하였다.

sRGB 표준과 다른 인광체를 사용한 비표준 디스플레이에 제안한 오차 보정 행렬을 적용함으로써 sRGB 표준

의 원 화상의 색에 더 가까운 색을 재현하였다. 이를 확인하기 위해서 Macbeth color checker의 시험 색을 사용한 색도 오차 보정 실험에서, 보정전의 색도 오차 ΔE_{uv}^* 가 0.009에서 오차 보정 행렬로 보정한 후에는 0.006으로 감소되어 평균 30% 정도의 개선 효과를 가지는 것을 확인하였다.

따라서 본 논문에서 제안한 오차 보정 행렬을 사용함으로써 물리적인 색도 오차를 보정하여 원 화상에 가까운 느낌의 재현 화상을 얻을 수 있고, 또한 제안한 방법은 PC용 디스플레이뿐만 아니라 일반 TV에도 응용이 가능할 것으로 생각된다. 그리고 재현된 영상의 밝기만의 변화에도 색상이 달라져 보이는 현상이나 조평광의 차이가 있을 때 색이 다르게 보이는 색 순응 현상 등, 디스플레이의 색 재현에 있어서 추가적으로 고려되어야 할 사항이 많으므로 이에 대해서는 추후 심도 있는 연구가 행해져야 할 것으로 생각된다.

References

- [1] M. Anderson, R. Motta, S. Chandrasekar, and M. Stokes, "Proposal for a Standard Default Color Space for the Internet: sRGB," *4th Color Imaging Conference: Color Science, Systems, and Applications*, pp.238-245, 1996.
- [2] C. A. Poynton, *Digital Video and HD: Algorithms and Interfaces*, Morgan Kaufmann Publishers, 2012.
- [3] CIE, *Commission internationale de l'Eclairage proceedings*, Cambridge University Press, 1932.
- [4] T. Smith and J. Guild, "The CIE colorimetric standards and their use," *Transactions of the Optical Society*, vol. 33, issue 3, pp.73 - 134, 1932.
- [5] D. L. MacAdam, *Color Measurement*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1985.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-38681-0>
- [6] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, Wiley-Interscience, 2000.
- [7] J. Schanda, *Colorimetry: Understanding the CIE System*, John Wiley & Sons, 2007.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470175637>
- [8] Y. Xiong, W. Li, B. Liang, L. Zhao, J. Peng, Y. Cao, and J. Wang, "Utilizing white OLED for full color reproduction in flat panel display," *Organic Electronics*, vol. 9, issue 4, pp. 533-538, 2008.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2008.02.017>
- [9] ITU-Radiocommunication Sector Information Handling Services, "Recommendation ITU-R BT.709-4," International Telecommunication Union, 2000.
- [10] ColorChecker, product No.50105(Standard) or No. 50111(Mini), manufactured by the Munsell Color services laboratory of GretagMacbeth.

김 은 수(Eun-Su Kim)

[정회원]



- 2000년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학석사)
- 2004년 3월 ~ 2005년 12월 : (주)HIT 책임연구원
- 2005년 2월 : 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학박사)
- 2006년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

CMS(color management system), 디스플레이 색 재현 및 화질개선, 임베디드 시스템