

논문 2005-42SP-5-3

주위 시환경의 색도 변화에 따른 색 순응 모델

(Chromatic Adaptation Model for the Variations of the Chromaticity under the Surround Viewing Conditions)

김 은 수*, 장 수 옥**, 이 성 학**, 송 규 익*

(Eun-Su Kim, Soo-Wook Jang, Sung-Hak Lee, and Kyu-Ik Sohng)

요 약

TV와 PC 모니터와 같은 컬러 디스플레이 장치 사용하는 실제 시환경은 표준 시환경과 상당히 다르다. 주위 시환경의 휘도와 색도의 변화에 따라 인간 시각계는 색 순응이 일어나게 되고, 사용자는 디스플레이 상에 재현된 측색적으로 동일한 색을 서로 다르게 느끼게 된다. 따라서 디스플레이에 재현된 색이 표준 시환경 하에서의 원래 색과 동일하게 재현하는 것이 중요하다. 본 논문에서는 동일한 휘도 조건에서 주위 조명광의 색도 변화에 따른 색 순응 모델을 제안한다. 제안한 색 순응 모델은 주위 시환경의 휘도 조건과 색도에 따라 시 세포의 L , M , 및 S 에 대한 감도의 이득을 모두 비선형 함수로 구한다. 그리고 제안한 색 순응 모델의 최적 이득 계수 값은 Breneman 색 순응 실험의 대응색 데이터들로부터 구한다. 제안한 색 순응 모델과 기존 모델들의 성능을 평가해 본 결과, 제안 방식의 색 순응 모델이 기존의 모델에 비해서 전 휘도 조건에서 매우 우수한 성능을 가짐을 확인하였다. 또한, 실제 시환경하에서 제안한 색 순응 모델을 이용하여 재현한 대응색이 표준 시환경 하에서의 원래의 색과 동일하게 보이는 것을 확인하였다.

Abstract

Real surround viewing conditions in watching the color display devices such as TV and PC monitor are quite different from the standard viewing conditions. Human visual system is adapted chromatically under the different viewing conditions in luminance levels and chromaticity of illuminants. Accordingly, the reproduced colors of the same chromaticity will appear as quite different color. Therefore, it is necessary that the displayed colors are reproduced to be appeared as the original colors in the standard viewing conditions. In this paper, we propose a chromatic adaptation model for the variations of the surround illuminants' chromaticity under the same luminance conditions. In proposed chromatic adaptation model, we calculate each gain of L , M , and S as nonlinear functions according to the chromaticity of the surround illuminants. And the optimal coefficients are obtained from the corresponding colors data of the Breneman's experiments. The proposed chromatic adaptation model is compared with the conventional chromatic adaptation models. In the experimental results, the proposed model has very good performance in the whole range of luminance levels. We also experimentally confirmed that the reproduced corresponding colors using the proposed chromatic adaptation are appeared as the original colors when the real surround viewing conditions are different from the standard viewing conditions.

Keywords: 색 순응 모델, 색 재현, 대응색 재현, human visual system, 디스플레이 색 신호처리

I. 서 론

TV 시스템과 같은 컬러 디스플레이 장치 (color

display device)에서 색을 재현하는 방법으로 표준 시환경(standard viewing conditions)^[1]에서의 원 피사체에 비례하는 자극치를 디스플레이 장치에 재현하는 측색적(colorimetric) 색 재현 방법과 살색이나 나뭇잎 색과 같은 특정 색에 대한 선호색(preferred) 재현 방법을 병용하는 색 재현 방법이 연구되어 왔다.^[2] 그러나 X , Y , 및 Z 의 3자극치(tristimulus values)가 동일할 때 같은

* 정회원, ** 학생회원, 경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering Kyungpook
National University)
접수일자: 2005년3월31일, 수정완료일: 2005년6월3일

색으로 보이는 조건은 관찰 조건이 동일할 때뿐이므로, 측색적 색 재현은 원 영상과 재현된 영상의 관찰 조건이 동일할 때만 유용한 색 재현 방법이다. 하지만 실제 컬러 디스플레이 장치를 사용하는 시환경은 표준 시환경과 상당히 다르고, 이처럼 시환경이 변화되면 인간 시각계 (human visual system, HVS)는 색 순응 (chromatic adaptation) 현상^{[3]-[9]}이 발생하게 되어 동일한 색을 서로 다른 색으로 느끼게 된다.

본 논문에서는 표준 시환경과 다른 시환경 하에서 디스플레이 장치를 사용할 때 원 피사체의 색과 동일한 느낌을 가지는 대응색 (corresponding color)^[3]을 재현하기 위한 색 순응 모델을 제안하였다. 제안한 색 순응 모델은 주위 시환경의 색도 및 휘도에 따라 시 세포의 L, M, 및 S 에 대한 감도 이득을 모두 비선형 함수로 구하였다. 그리고 최적 이득 계수 값은 색 순응 모델의 성능 평가로 많이 사용 되고 있는 Breneman 색 순응 실험^[9]에 의한 주위 휘도별 대응색 실험 데이터들로부터 구하였다. 따라서 제안한 색 순응 모델을 적용하게 되면 TV와 PC 모니터와 같은 컬러 디스플레이 장치를 사용하는 다양한 조건의 시환경에서 원 화상과 동일한 대응색을 재현할 수 있을 것이다.

II. 기존의 색 순응 모델

색도가 서로 다른 시환경 하에서 동일하게 보이는 대응색을 예측하기 위한 색 순응 모델은 여러 가지로 제안되었다.^{[3]-[14]} von Kries^[5]와 Breneman^[9] 모델 등과 같이 인간 시각의 비례 계수 비가 선형적으로 변화한다고 가정한 선형 색 순응 모델과 Bartleson,^{[6]-[7]} Fairchild,^{[3],[10]-[11]} 및 Modified von Kries (MvK)^{[13]-[14]} 모델 등과 같이 각 자극에 대한 비례계수의 비가 비선형적으로 발생한다고 가정한 비선형 변환 모델이 있다. von Kries와 Breneman 모델은 주위 시환경의 휘도가 고휘도인 경우 대응색의 예측이 우수하나, 일반 가정이나 사무실에서의 휘도 범위에서는 예측색 오차가 증가한다. 비선형 순응 모델인 Bartleson 모델은 주위 휘도가 낮은 시환경에서는 대응색을 잘 예측하지만 주위 휘도가 높은 시환경에서는 예측색 오차가 증가되며, 특히 푸른 색 계열의 색도에서 큰 오차가 나타난다. 인쇄물과 같은 반사체에서의 대응색 재현을 목표로 하여 개발된 Fairchild 모델은 비선형 변환 함수를 사용하였으며 계산식이 복잡하다는 단점이 있다. 최근에 제안된 MvK

모델은 von Kries 모델과 유사하게 주위 휘도가 높은 시환경에서는 대응색 예측이 우수하지만, 우리가 디스플레이 장치를 사용하고 있는 정도의 시환경에서는 Bartleson 모델보다 더 큰 색 재현 오차가 발생하는 단점이 있다.

III. 주위 시환경의 색도 변화에 따른 색 순응모델 제안

본 논문에서는 그림 1에 나타낸 것과 같이 표준 시환경과 서로 다른 색도를 갖는 시환경 하에서 컬러 디스플레이 장치를 사용할 때 나타나는 인간 시각계의 색 순응 현상을 고려하여 원 피사체의 색과 동일하게 보이는 대응색을 재현하며, 기존의 색순응 모델들의 단점을 보완할 수 있고 예측 성능이 더 우수한 주위 시환경의 색도 변화에 따른 색 순응 모델인 CAM Δ_{xy} 를 제안하였다. 여기서 CAM은 색 순응 모델을, Δ_{xy} 는 시환경의 색도 차를 의미하고 있다.

제안한 색 순응 모델의 모델링 과정을 자세한 수식으로 나타내면

$$\begin{bmatrix} L \\ M \\ S \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9182 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (1)$$

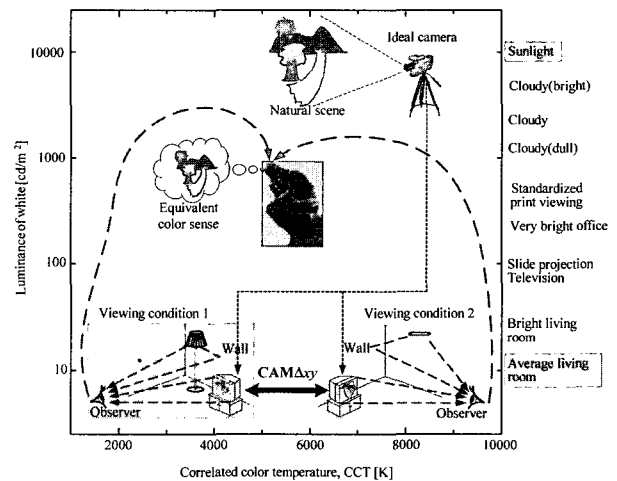


그림 1. 색 순응 모델의 필요성과 주위 시환경의 색도 변화에 따른 대응색 재현을 위한 색 순응 모델 제안

Fig. 1. The necessity of chromatic adaptation model and proposed chromatic adaptation model for the corresponding color reproduction considering the chromaticity of the surround viewing conditions.

$$\begin{aligned} L_a &= k_L L_1 \\ M_a &= k_M M_1 \\ S_a &= k_S S_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$k_L = \left(\frac{L_{\max 2}}{L_{\max 1}}\right)^{p_L}, \quad k_M = \left(\frac{M_{\max 2}}{M_{\max 1}}\right)^{p_M}, \quad k_S = \left(\frac{S_{\max 2}}{S_{\max 1}}\right)^{p_S} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} k_L & 0 & 0 \\ 0 & k_M & 0 \\ 0 & 0 & k_S \end{bmatrix} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

와 같이 구할 수 있다. 여기서 \mathbf{M} 은 Hunt-Pointer-Estevéz 변환 행렬^[3]이고, XYZ 는 3 자극치이고, L_1 , M_1 , 및 S_1 는 순응 전인 원 피사체의 시각 자극치 값들이고, $L_{\max 1}$, $M_{\max 1}$, 및 $S_{\max 1}$ 은 원 피사체의 백색 혹은 순응 전 시환경의 최대 시각 자극치 값들을 나타낸다. L_a , M_a , 및 S_a 는 순응 후의 시각 자극치 값들이고, $L_{\max 2}$, $M_{\max 2}$, 및 $S_{\max 2}$ 는 눈의 순응 후 시환경 하의 백색 혹은 최대 시각 자극치 값들을 나타낸다. 식 (3)에 사용된 k_L , k_M , 및 k_S 는 순응 전인 원 피사체의 자극치로부터 달라진 주위 시환경에 의해 순응 후의 시각 자극치로 변환하기 위한 비례 계수이다. 여기서, 비례 계수 k_L , k_M , 및 k_S 에 지수로 쓰이는 p_L , p_M , 및 p_S 는 주위 시환경의 휘도에 따라 변화하는 지수 값이다. 지수 p_L , p_M , 및 p_S 는 Breneman 색 순응 실험 데이터로부터 최소 오차를 가지는 값을 구하였고, 이를 주위 시환경의 모든 휘도 범위에 대해 제안한 색 순응 모델을 적용하기 위한 모델링 함수는

$$\begin{aligned} p_L &= \begin{cases} -0.1621 + 0.7446 \log Y - 0.1550 (\log Y)^2, & (Y \leq 350 \text{ cd/m}^2) \\ -0.0719 + 0.3994 \log Y - 0.0332 (\log Y)^2, & (Y > 350 \text{ cd/m}^2) \end{cases} \\ p_M &= 1.0508 + 0.0528 \log Y - 0.0434 (\log Y)^2 + 0.0067 (\log Y)^3 \\ p_S &= \begin{cases} 0.1209 + 0.4338 \log Y - 0.0936 (\log Y)^2, & (Y \leq 350 \text{ cd/m}^2) \\ \frac{0.8598Y}{137.9781 + Y} + 0.0000058Y, & (Y > 350 \text{ cd/m}^2) \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

와 같다. 여기서 p_L 및 p_S 은 주위 휘도에 따라 지수 값의 경향성이 많이 달라서 주위 휘도 350 cd/m^2 을 경계로 구분하여 함수를 구하였다. 이러한 주위 시환경의

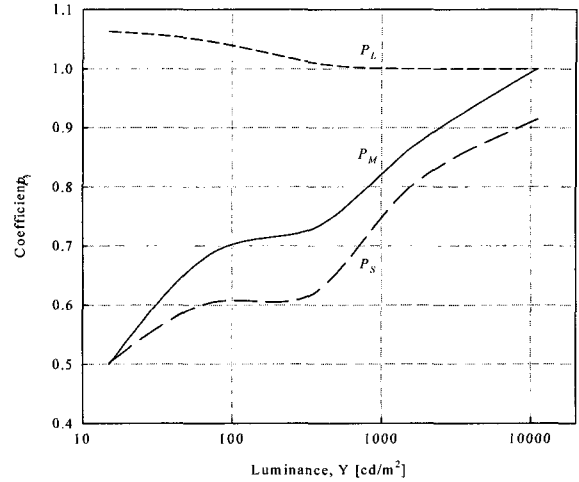


그림 2. 제안한 모델의 지수 p_i 모델링 함수
Fig. 2. Modeling functions of the proposed model's exponent P_i .

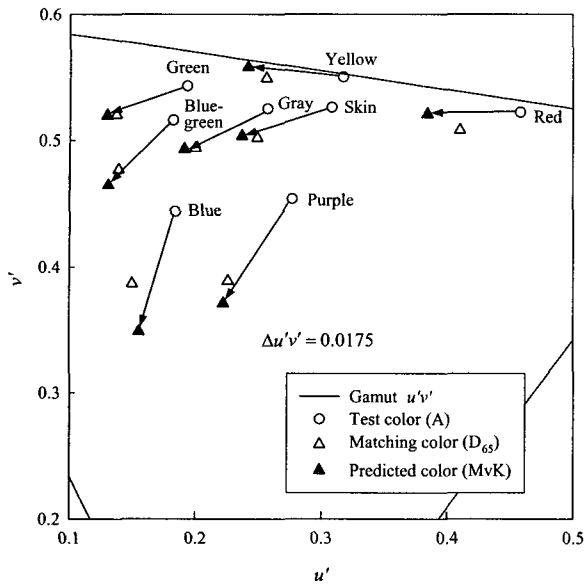
휘도에 따른 지수 p_L , p_M , 및 p_S 의 모델링 함수는 그림 2에서의와 같다.

제안한 색 순응 모델은 주위 시환경의 임의의 휘도에 따른 최적의 지수 p_L , p_M , 및 p_S 를 구함으로써 달라진 시환경에 의해 순응된 후에 동일하게 느껴지는 대응색을 예측할 수 있게 하였고, 시환경의 휘도가 결정되면 식 (3)의 비례 계수 k_L , k_M , 및 k_S 가 상수가 되고, 식 (2)의 색 순응 전 후의 시각 자극치의 변환이 선형 변환이 됨으로 디스플레이 장치에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

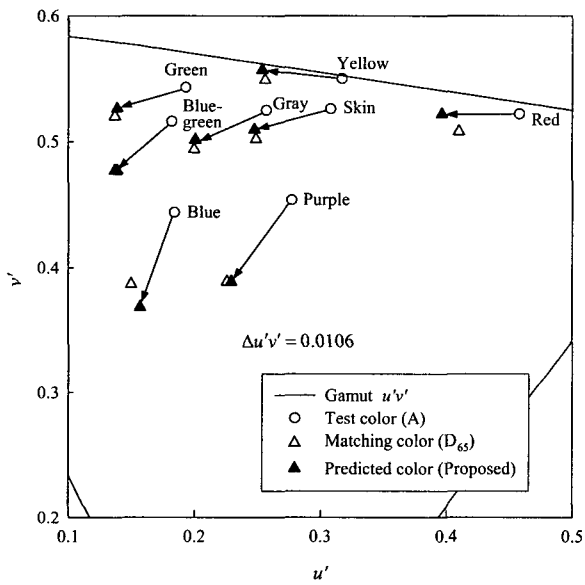
그림 3은 휘도가 350 cd/m^2 인 A 광원과 D65 광원 하에서 제안한 색 순응 모델과 기존의 색 순응 모델들 중 예측색 오차가 가장 적은 MvK 모델에 의한 예측색을 Breneman 실험의 대응색 데이터를 비교하여 $u'v'$ 좌표계로 나타내었다. 여기서 기존 MvK 모델의 예측색 오차 $\Delta u'v'$ 가 0.0175 인 것에 비해서 제안한 색 순응 모델에 의한 예측색 오차는 0.0106으로 Breneman의 대응색에 더 근접하게 예측되고 있음을 알 수 있다.

IV. 실험 및 고찰

1. 색 순응 모델 간의 색 재현 오차에 대한 평가
제안한 색 순응 모델과 기존 모델간의 색 재현 성능을 비교하였다. 비교 평가에 사용된 기존 모델로는 선



(a)



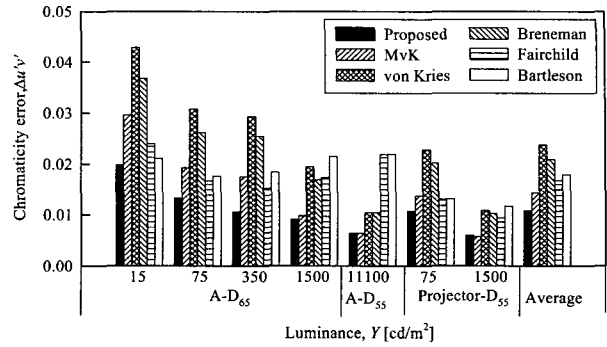
(b)

그림 3. (a) MvK 모델과 (b) 제안한 모델에 의해 예측된 대응색 : 주위 휘도 350 cd/m²

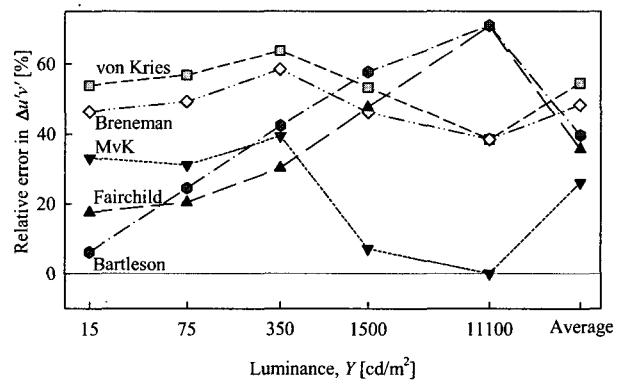
Fig. 3. Predicted corresponding colors by (a) the MvK model and (b) the proposed model : Surround luminance 350 cd/m².

형 변환 모델인 von Kries 및 Breneman 모델과 비선형 모델인 Bartleson, Fairchild, 및 MvK 모델이며, 색 순응 모델의 성능 평가에 많이 사용되고 있는 Breneman 실험의 대응색 데이터를 사용하여 비교하였다.

제안한 색 순응 모델의 예측색 성능을 정량적 평가하기 위한 CIE $u'v'$ 좌표계에서의 측색적 좌표 오차는



(a)



(b)

그림 4. 기존의 색 순응 모델과 제안 모델의 성능 비교: (a) 측색적 좌표 오차, $\Delta u'v'$ (b) 상대적인 측색적 좌표 오차

Fig. 4. Performance comparison of the proposed model and the conventional chromatic adaptation models : (a) Chromaticity errors, $\Delta u'v'$; (b) relative chromaticity errors.

$$\Delta u'v' = \sqrt{(\Delta u')^2 + (\Delta v')^2} \quad (6)$$

와 같고, CIE $L^*u^*v^*$ 좌표계를 이용한 휘도 Y 성분을 고려한 색 재현 오차는

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*/4)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (7)$$

와 같다.^[4] 여기서, 휘도 값에 1/4이 곱해진 이유는 TV와 같은 컬러 디스플레이 장치에서는 색 재현 오차 계산 시 휘도에 대한 가중치를 1/4로 줄이는 것이 좋다고 알려져 있기 때문이다.^[16]

먼저, 기존 색 순응 모델과 제안한 모델에 의해 구한 예측색들과 Breneman의 실험에서 얻은 대응색들 간의 측색적 좌표 오차는 그림 4 (a)에서와 같다. 그림에 나타나 있듯이 von Kries, Breneman, 및 MvK 모델에서는 휘도가 감소할수록 측색적 좌표 오차가 증가하며,

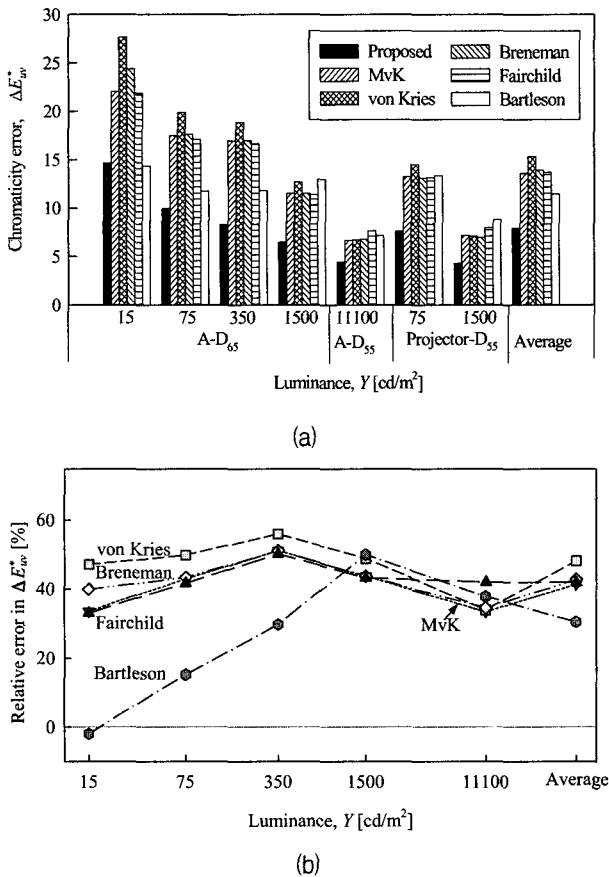


그림 5. 주위 시환경의 색도 변화에 따른 기존의 색 순응 모델에 대한 제안 모델의 성능 비교: (a) 색 재현 오차, ΔE_{uv}^* (b) 상대적인 색 재현 오차

Fig. 5. Performance comparison of the proposed model with conventional chromatic adaptation models for different chromaticity of the surround viewing conditions: (a) Color reproduction errors, ΔE_{uv}^* ; (b) relative color reproduction errors.

Fairchild 모델은 휘도 변화에 따라 오차의 변동폭은 작지만 휘도가 증가할수록 오차가 증가하는 경향을 가지고 있다. 그러나 제안한 모델의 경우 측색적 좌표 오차가 전체 휘도 범위에서 기존의 색 순응 모델보다 작게 나타날 뿐 아니라, 휘도가 증가할수록 오차가 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 기존 색 순응 모델에 대한 제안 모델의 측색적 좌표 오차의 상대적 향상 정도는 그림 4 (b)에서와 같다. 여기서, 실험을 한 모든 주위 시환경의 휘도 조건 하에서 제안한 모델의 평균 측색적 좌표 오차 $\overline{\Delta u'v'}$ 는 0.0108로서 von Kries 모델의 0.0238 보다는 54.6 %, Bartleson 모델의 0.0168 보다는 39.7 %, 그리고 기존의 모든 모델들과 비교해서 동등 이상의 성능을 가지는 MvK 모델의 평균 오차

0.0146 보다 26.0 %가 감소되어 제안한 모델의 색 재현 성능이 가장 우수함을 알 수 있다.

다음으로, 제안 모델과 기존의 색 순응 모델에 의해 재현된 예측색을 휘도 성분을 고려한 색 재현 오차 (ΔE_{uv}^*)를 구하여 그림 5 (a)에 나타내었다. 여기서, 제안한 색 순응 모델에 의한 예측색의 평균 색 재현 오차가 기존의 색 순응 모델에 비해 가장 작은 것을 알 수 있고, 기존의 모델들 중에는 Bartleson 모델이 색 재현 오차가 가장 작으며, 다음으로 MvK, Fairchild, Breneman, 및 von Kries 모델 순서임을 알 수 있다. 그리고 기존의 색 순응 모델에 비해 제안 모델의 평균 색 재현 오차의 상대적 향상 정도를 나타내면 그림 5 (b)에서와 같고, 실험을 한 모든 주위 시환경의 휘도 조건 하에서 제안한 모델의 평균 색 재현 오차 $\overline{\Delta E_{uv}^*}$ 가 Fairchild 모델에 비해서 39.5 %, Breneman 모델에 비해서 40.5 %, von Kries 모델에 비해서 46.0 %, MvK 모델에 비해서 39.0 %의 성능 향상이 있고, 기존 모델 중 색 재현 오차가 가장 작은 Bartleson 모델에 비해서도 27.7 % 이상의 색 재현 성능 향상을 확인하였다.

2. 단순 화상을 이용한 색 재현 성능 평가

Breneman의 색 순응 실험에서 구한 대응색 데이터를 기준으로 하여 기존의 색 순응 모델 및 제안 모델에 의한 예측된 색들을 모니터 상에 직접 재현시켜 주관적인 비교 평가를 하였다. 실험에 사용된 디스플레이 모니터는 Sony 사의 21인치 모니터인 CPD G-500 모델을 사용하였고, 주위 조명광의 영향을 배제하기 위하여 암실 상태에서 비교 평가하였다. 실험에 사용된 테스트 화상은 A 광원과 D65 광원 하에서 휘도가 각각 15, 75, 350, 및 1500 cd/m^2 일때의 Breneman 색 순응 실험의 대응색 데이터를 사용하였다.

각 휘도에 따른 D65 광원 하에서 Breneman의 대응색과 기존 색 순응 모델 및 제안 모델로 구한 D65 광원 하에서의 예측색을 재현하여 그림 6에 나타내었다. 이 그림에서 제안 모델에 의한 예측색 화상들이 Breneman의 대응색 데이터 화상과 가장 유사함을 볼 수 있다. 즉, 기존의 Bartleson 모델에 의한 화상들은 푸른 색 계열의 색도에서 큰 차이가 발생하며, 특히 휘도가 높은 경우 눈에 더욱 두드러지는 것을 확인할 수 있다. von Kries과 MvK 모델에 의한 화상은 저휘도에서 푸른 색

Luminance [cd/m ²]		15	75	350	1500
Predicted colors	Matching colors				
	D ₆₅				
	Proposed				
	von Kries				
	Bartleson				
MvK					

그림 6. D₆₅ 광원에서의 Breneman 실험의 대응색을 이용한 예측색 비교
 Fig. 6. Comparison of the predicted colors using the Breneman's matching colors for illuminant D₆₅.

계열에서 큰 색도 차이가 나타남을 확인할 수 있다. 그리고, MvK 모델은 휘도가 낮은 경우에 Bartleson 모델보다 더 큰 색도 차이를 보이는 것을 알 수 있다. 이에 비해서 제안 모델에 의한 예측 화상은 전 휘도 범위에서 색 재현 성능이 가장 우수함을 알 수 있다. 따라서 제안한 색 순응 모델은 기존의 von Kries와 MvK 모델의 저휘도에서의 큰 오차와 Bartleson 모델의 고휘도에서의 큰 오차를 보완할 수 있는 우수한 색 순응 모델임을 확인할 수 있다.

3. 색 순응 재현 시스템을 이용한 복합 화상의 평가
 실제의 시환경은 여러 가지의 주위 광들이 존재하며, 디스플레이의 화상은 단색이 아닌 복합 색으로 이루어져 있다. 일반 가정에서의 시환경을 LCD 모니터의 전체 화면과 뷰잉 박스 (viewing box)로 가정하고, 자연 영상을 모니터 화면 중앙에 재현시켜 복합 화상에 대한 주관적 비교 평가를 하였다. 실험에 사용한 뷰잉 박스는 GretagMacbeth 사의 The Judge II 모델이고, 일반 시환경에서 복합 화상에 대하여 변화한 뷰잉 박스의 조

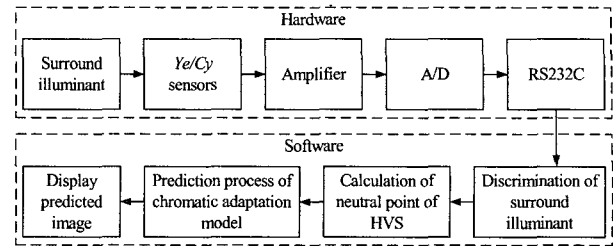


그림 7. 색 순응 재현 시스템의 블록도
 Fig. 7. A block diagram of chromatic adaptation reproduction system.

명에 따른 예측된 대응색 화상을 실시간으로 볼 수 있는 색 순응 재현 시스템을 그림 7에 나타낸 블록도와 같이 구현하였다.

먼저, 색 순응 재현 시스템의 하드웨어 부분은 주위 조광으로부터 입사되는 광을 광센서 (SANYO, AM-32-CY-02)를 통해 Ye(Yellow) 및 Cy(Cyan)의 전압 값으로 출력하고, 이 전압 값은 구현한 하드웨어에 적용 가능하도록 증폭을 하게 된다. 증폭된 전압 값은 A/D

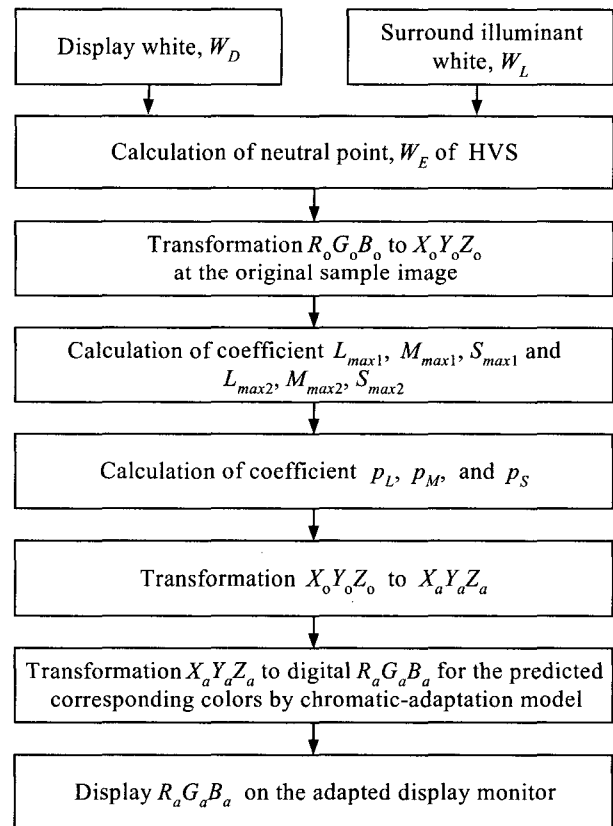


그림 8. 구현한 색 순응 재현 시스템의 복합 화상 예측 과정
 Fig. 8. Prediction process of a complex image in the implemented chromatic adaptation reproduction system.

Surround illuminant	CAMs	Sample images (Luminance of white, 250 cd/m ²)	
D ₆₅	Original image		
A	von Kries		

그림 9. D₆₅에서 A로의 색 순응 모델들을 이용한 예측 화상의 비교

Fig. 9. Comparison of the predicted images of various chromatic adaptation models from surround illuminant D₆₅ to A.

컨버터에서 디지털 값으로 변환되고, 조명광의 세기와 주위 조명광의 색 좌표를 추정하기 위해서 RS-232C 통신으로 연산 프로세서에 전달하게 된다. 다음으로, 소프트웨어 부분은 주위 조명광에 대한 광센서의 출력 전압을 받아들이고, 출력 전압의 Y_e/C_y 비를 계산하여 조명광을 판별하게 된다.^[14] 그리고 디스플레이 장치의 기준 백색과 주위 조명광에 의해 변화된 인간 시각의 순응 화이트를 결정하게 되고,^[14] 그림 8의 색 순응 모델에 의해 예측된 대응색의 복합 화상을 재현하기 위한 과정을 거쳐 예측된 화상을 LCD 모니터에 디스플레이하게 된다. 구현한 색 순응 재현 시스템의 각 색 순응 모델별 예측 화상은 그림 9에서와 같다.

그림 9에 나타낸 표준 시환경인 D₆₅ 하의 원 화상은 왼쪽 모니터에 디스플레이하고, 오른쪽 모니터에는 변화된 조명광에 의한 바뀐 시각 순응 화이트 상태에서

각 색 순응 모델에 의해 예측된 대응색 화상을 디스플레이하여 평가하였다. 주관적 비교 평가 실험에 참가한 인원은 7 명이며, 실험 이전에 색 순응 현상과 대응색에 대한 개념을 인지시킨 뒤, 양안 독립 동시 비교 평가 방법인 하플로스코픽 (haploscopic) 방법^{[13],[13]}을 이용하여 실험하였다. 또한 실험자의 눈을 각 시환경과 모니터에 재현된 복합 화상에 순응시키기 위하여 20 분 동안 응시 한 뒤에 주관적인 평가를 하였다.

원 화상과 각 색 순응 모델에 의한 예측 화상에 대한 주관적 비교 실험을 한 결과, von Kries 와 MvK 모델에 의한 예측 화상은 원 화상에 비해서 전체적으로 붉은 색의 경향을 많이 띄고 있다고 판단하였으며, 제안 모델에 의해 예측된 화상은 원 화상과 거의 동일한 색으로 판단하였다. 그리고 관찰자 전원이 제안 모델에 의해 예측된 화상이 von Kries 와 MvK 모델에 의해 예측된 화상에 비해서 미세하게 푸른 색 경향을 보인다고 하였다. 이는 제안한 색 순응 모델이 von Kries 와 MvK 모델에 비해서 푸른 색 영역에서 색 재현 오차의 향상이 있었기 때문에 나타나는 현상이다. 이와는 달리 Bartleson 모델에 의해 예측된 대응색 화상의 경우에는 푸른 색 계열에서 색 재현 오차가 많이 발생하여, 원 화상과 주관적 평가를 위한 만족할 만한 대응색으로 평가되지 않았다. 이것은 평균적인 색 재현 오차가 작아도 특정한 색에 대한 오차가 크게 나타나게 됨으로써 관찰자의 눈에 크게 띄게 되기 때문으로 판단된다.

다음으로, 화이트 밸런스 (white balance)의 가변이 가능한 디지털 스틸 카메라(digital still camera, DSC)인 Kodak DC4800을 사용하여 구현한 색 순응 재현 시스템에서 제안 모델을 객관적으로 평가하였다. 여기서 실험에 사용한 디지털 카메라를 변화한 주위 조명광에 완전히 순응된 눈으로 가정하였다. 즉, 변화되는 주위 시 환경에 눈이 완벽하게 순응되었을 때의 눈의 화이트를 디지털 카메라에서의 화이트 밸런스 점으로 생각할 수가 있고, 변화한 주위 조명광에 의해 바뀐 시 환경에 디지털 카메라의 화이트 밸런스를 맞추고, 그 때 촬영된 화상을 통해 성능을 평가하였다.

평가를 위한 제안 모델에 의해 예측된 복합 화상은 그림 10 (a)에서와 같고, 이를 주위 조명에 따라 디지털 카메라의 화이트 밸런스를 맞추어 촬영한 화상은 그림 10 (b)에서와 같다. 그림 10 (b)의 우측 그림에서 뷰잉 박스의 내부 벽면이 중간 그레이로 보이는 것을 알 수

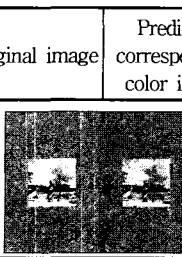
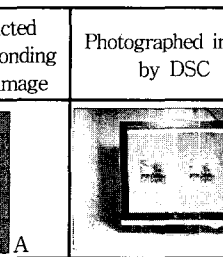
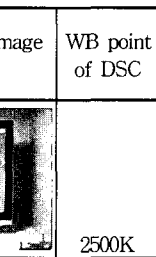
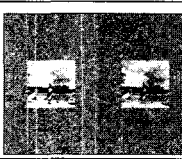
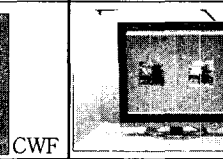
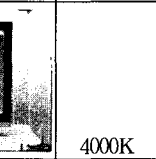
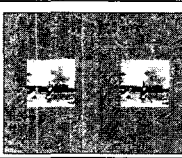
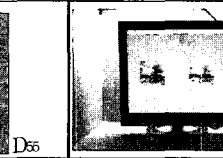
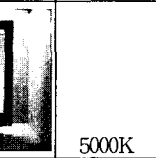
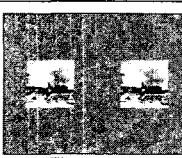
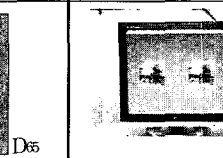
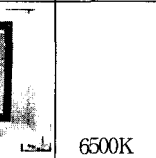

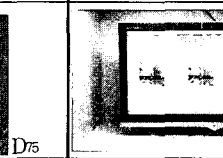
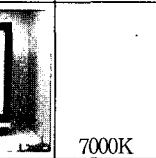
Original image	Predicted corresponding color image	Photographed image by DSC	WB point of DSC
 D65	 A		2500K
 D65	 CWF		4000K
 D65	 D65		5000K
 D65	 D65		6500K
 D65	 D75		7000K
(a)		(b)	

그림 10. 구현한 색 순응 재현 시스템을 통한 평가: (a) D65 하의 원 화상과 각 광원 하의 예측된 대응색 화상 (b) 디지털 카메라를 이용하여 촬영한 화상.
 Fig. 10. An evaluation using the proposed chromatic adaptation reproduction system: (a) illustrate the original image under D65 and the predicted corresponding color images the proposed model under each surround illuminant; (b) illustrate the photographed image by the DSC.

있다. 이는 뷰잉 박스의 각 조명광 하에서 선택한 디지털 카메라의 화이트 밸런스점이 조명광에 의해 변화된 눈의 순응 화이트 점과 유사하다는 것을 나타내고 있다. 그리고 테스트 화상의 외각 부분인 모니터의 배경 부분은 각 조명광에 의한 예측 대응색 화상의 중간 그레이에 해당된다. 이 역시 화이트 밸런스를 조정하여 촬영한 화상에서 색을 띄지 않은 그레이로 나타나고 있으며, 복합 화상 역시 자연스러운 색을 띄고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 실제 구현한 색 순응 재현 시스템이 변화된 시환경에 따라 적절한 대응색 화상을 예측하여 디스플레이되는 것을 확인할 수 있다. 이와 같이 화이트 밸런스의 가변이 가능한 디지털 카메라를 통해 제안

한 색 순응 모델의 성능을 객관적으로 평가하여 본 결과, 제안한 색 순응 모델은 변화된 시환경을 판별하여 이에 맞는 적절한 대응색을 예측함으로써 바뀐 시환경 하에서도 동일한 색감을 가지는 화상을 재현할 수 있는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 표준 시환경과 다른 시환경 하에서 컬러 디스플레이 장치를 사용할 때 발생하게 되는 인간 시각계의 색 순응 현상을 고려하여 표준 시환경에서의 원 피사체와 동일하게 보이는 대응색을 재현할 수 있는 색 순응 모델을 제안하였다. 제안한 색 순응 모델은 서로 다른 색도의 시환경의 휘도에 따라서 *L*, *M*, 및 *S* 시세포의 이득 비율을 모두 비선형 함수로 모델링하였다. 그리고 제안한 색 순응 모델의 변환 행렬은 주위 시환경의 색도와 휘도가 결정되면, 자극치 비의 이득이 선형 함수인 3×3 정방 행렬이 되어 컬러 디스플레이 장치에 쉽게 적용할 수가 있는 장점이 있다.

제안한 색 순응 모델의 예측색 재현성을 기존의 색 순응 모델과 모의 실험을 통해 정량적으로 평가해 본 결과, 제안 모델에 의한 예측색의 평균 측색적 좌표 오차, $\overline{\Delta u'v'}$ 는 0.0108로 von Kries 모델에 비해서 54.6%, Bartleson 모델에 비해서 39.7%, 그리고 기존의 모든 모델들과 비교해서 동등 이상의 성능을 가지는 MvK 모델에 비해서도 26.0%가 감소된 것을 확인하였다. 그리고 구현한 색 순응 재현 시스템을 통해 복합 화상에 대한 주관적 비교 평가 실험에서 제안한 모델에 의한 예측 대응색이 기존의 색 순응 모델에 비해 전 휘도 범위에서 원 화상과 가장 유사함을 확인하였다.

차후 연구 과제로는 본 논문에서 제안한 색 순응 모델을 디스플레이 시스템에 적용하기 위해서는 수상기로 사용되는 직시형 모니터 및 투사형 모니터 등의 각종 디스플레이 장치에 대한 색 재현 특성과 시환경 분석을 통해 제안 모델을 적용할 수 있게 하여야 하며, 색 순응 모델에 의한 대응색 재현과 더불어 일반 시청자가 좋아하는 기호를 만족시키기 위한 백색, 살색, 및 녹색 등의 선호색 재현 방법을 동시에 고려하는 디스플레이 색 재현에 대한 연구가 앞으로 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] M. Stokes and M. Anderson, "A standard default color space for the internet-sRGB," <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>, 1996.
- [2] R. W. G. Hunt, *The Reproduction of Colour in Photography, Printing & Television*, Fountain Press, England, pp. 177-196, 1987.
- [3] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Addison-Wesley, New York, pp. 173-345, 1998.
- [4] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 117-451.
- [5] D. L. MacAdam, *Color Measurement*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1981, pp. 200-208.
- [6] C. J. Bartleson, "Comparison of chromatic-adaptation transforms," *Color Res. Appl.*, vol. 3, pp. 129-136, Fall 1978.
- [7] C. J. Bartleson, "Changes in color appearance with variations in chromatic adaptation," *Color Res. Appl.*, vol. 4, pp. 119-138, Fall 1979.
- [8] 최덕규, "시각계 색 순응을 고려한 텔레비전 수상기에서의 색 재현," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 1997년 6월.
- [9] E. J. Breneman, "Corresponding chromaticities for different states of adaptation to complex visual fields," *J. of Opt. Soc. Am.*, vol. 4, pp. 1115-1129, June 1987.
- [10] M. D. Fairchild, "A model of incomplete chromatic adaptation," *Proc. the 22nd Session of the CIE*, Melbourne, pp. 33-34, 1991.
- [11] M. D. Fairchild, "Formulation and testing of an incomplete-chromatic-adaptation model," *Color Res. Appl.*, vol. 16, pp. 243-250, 1991.
- [12] CIE TC1-34 Final Report, *The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version)*, CIECAM97s, 1998.
- [13] 권용대, "조명에 따른 디스플레이 대응색 재현 모델," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 2001년 12월.
- [14] E.-S. Kim, S.-W. Jang, Y.-D. Kwon, C.-H. Han, and K.-I. Sohng, "Corresponding-color reproduction model according to surround viewing conditions," *IEICE Trans. Fund.*, vol. E87-A, no. 6, pp. 1514-1519, June 2004.
- [15] D. M. Purdy, "Spectral hue as a function of intensity," *Am. J. of Psych.*, vol. 43, pp. 541-559, 1931.
- [16] L. E. DeMarsh and J. E. Pinney, "Studies of some colorimetric problems in color television," *J. of SMPTE*, vol. 79, pp. 338-342, April 1970.

저 자 소 개

김 은 수(정회원)
제 42권 SP편 제 4호 참조

장 수 욱(학생회원)
제 42권 SP편 제 4호 참조

이 성 학(학생회원)
제 42권 SP편 제 4호 참조

송 규 익(정회원)
제 42권 SP편 제 4호 참조