

논문 2005-42SP-4-4

동일 색도 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델

(Chromatic adaptation model for the variations of the luminance of the same chromaticity illuminants)

김 은 수**, 장 수 욱**, 이 성 학**, 송 규 익*

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

요 약

본 논문에서는 동일 광원에서 휘도 변화에 따른 색 순응 현상을 고려하여 원 피사체와 동일하게 보이는 대응색을 재현할 수 있는 색 순응 모델을 제안한다. 제안한 CAM ΔY 는 저휘도 상태의 시험 색과 동일하게 보이는 고휘도의 상태의 대응색으로 변환하는 변환 행렬로 모델링하고, 제안 모델의 최적 계수 값들은 Breneman이 실험한 주위 휘도별 대응색 데이터들로부터 구한다. 제안한 색 순응 모델인 CAM ΔY 에 의한 예측 대응색과 Breneman의 실험 데이터 간의 측색적 좌표 오차 $\Delta u'v'$ 를 비교해 본 결과, Breneman의 D55 광원의 세 가지 서로 다른 밝기에 대한 실험의 대응색과 제안한 모델에 의해 예측된 색과의 평균 측색적 좌표 에러 $\overline{\Delta u'v'}$ 의 값이 0.004 정도로, 이는 제안 모델의 평균 측색적 좌표 오차가 인접한 (adjacent) 두 컬러 샘플간의 구별 색차 정도로 아주 작은 오차를 가짐으로 그 성능이 매우 좋음을 확인하였다. 또한 제안한 CAM ΔY 를 이용하여 동일 광원의 밝기에 따른 동일한 백색으로 보이는 등백색 상관 색온도 곡선 (equal-whiteness CCT curve, EWC)을 제안한다. 제안한 등백색 상관 색온도 곡선은 이제까지 TV 제조업자들의 경험에 의해 결정된 디스플레이 장치의 기준 백색을 설정하는 정량적인 기준으로 사용될 수 있다.

Abstract

In this paper, we propose the chromatic adaptation models (CAM) for the variations of the luminance levels. A chromatic adaptation model, CAM ΔY , is proposed according to the change of luminance level under the same illuminants. The proposed model is obtained by the transform the test colors of the high luminance into the corresponding colors of the low luminance. In the proposed model, the optimal coefficients are obtained from the corresponding colors data of the Breneman's experiments. In the experimental results, we confirmed that the chromaticity errors, $\overline{\Delta u'v'}$, between the predicted colors by the proposed model and the corresponding colors of the Breneman's experiments are 0.004 in $u'v'$ chromaticity coordinates. The prediction performance of the proposed model is excellent because this error is the threshold value that two adjacent color patches can be distinguished. Additionally, we also propose equal-whiteness CCT curves (EWCs) by CAM ΔY according to the luminance levels of the surround viewing conditions. And the proposed EWCs can be used as the theoretical standard which determines the reference white of the color display devices.

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

I. 서 론

TV 시스템과 같은 컬러 디스플레이 장치 (color display device)에서 색을 재현하는 방법으로 표준 시환

경 (standard viewing conditions)^[1]에서의 원 피사체에 비례하는 자극치를 디스플레이 장치에 재현하는 측색적 (colorimetric) 색 재현 방법이 연구되어 왔다.^[2] 그러나 XYZ 3자극치 (tristimulus values)가 동일할 때 같은 색으로 보이는 조건은 관찰 조건이 동일할 때뿐이므로, 측색적 색 재현은 원 영상과 재현된 영상의 관찰 조건이 동일할 때만 유용한 색 재현 방법이다.

실제 컬러 디스플레이 장치를 사용하는 시환경은 표

* 정회원, ** 학생회원, 경북대학교 전자공학과
(Dept. of Electronics Engineering Kyungpook National University)

접수일자: 2005년2월22일, 수정완료일: 2005년4월29일

준 시환경과 상당히 다르고, 시환경이 변화되면 인간 시각계 (human visual system, HVS)는 동일한 색을 서로 다른 색으로 느끼게 되는 여러 가지 현색적 현상 (color appearance phenomena)^{[3]-[9]}이 일어나게 된다. 즉, 우리가 생활하고 있는 외부 시환경은 10000 cd/m^2 정도로 매우 높은 휘도^{[10],[11]}를 갖는 5500~6000 K의 일광 (daylight) 하의 상태^{[12],[13]}이다. 일광 하의 실외에서 영상을 촬영한 후, TV나 PC (personal computer) 모니터와 같은 컬러 디스플레이 장치를 통해 시청하게 되는 가정의 실내 환경은 평균 휘도가^{[10],[11]} 10 cd/m^2 정도가 되는 백열등 및 형광등과 같은 여러 가지 색도의 조명 광 하의 상태이다. 이와 같이 시환경의 휘도 및 색도 변화에 의하여 인간 시각계에서는 최대 감도가 각각 575, 530, 및 455 nm인 3 가지 종류의 색을 구별하는 시 세포 L (long), M (middle), 및 S (short)의 이득비가 달라지게 되는 색 순응 (chromatic adaptation) 현상^{[3],[14]-[20]}이 나타나게 되고, 이러한 색 순응 현상으로 인하여 사용자는 디스플레이 상에 재현되는 색을 서로 다르게 느끼게 된다.

Breneman의 색 순응 실험^[20]에서 알 수 있듯이, 주위 시환경의 변화에 따른 색 순응 현상 중 일반적으로 잘 알려져 있는 시환경의 색도 차이에 의한, 즉 동일한 휘도를 갖는 조명 상태에서 조명의 색도인 상관 색온도 (correlated color temperature, CCT)가 다른 시환경에 의해 발생한다. 또한 동일한 색도를 가지는 조명 하 일지라도 휘도가 서로 다른 시환경 상태에서도 색 순응 현상이 일어나게 된다. 따라서 주위 조명의 변화에 의한 다양한 시환경 하에서도 표준 시환경에서의 원 피사체와 동일한 느낌의 색을 재현하기 위해서는 시환경의 휘도와 색도의 변화에 의해 발생하는 인간 시각계의 색 순응 현상을 고려한 색 '순응' 모델 (chromatic adaptation model, CAM)이 요구된다. 먼저, 동일한 휘도를 갖는 서로 다른 색도의 조명에 의한 색 순응 현상을 고려하여 동일한 느낌의 색인 대응색으로 재현하는 색 순응 모델은 여러 가지가 제안되어져 있다.^{[3],[14]-[25]} 하지만, 동일한 색도인 상관 색온도를 갖는 시환경에서 휘도의 변화에 따른 색 순응 현상에 대해서는 거의 알려진 바가 없고, 주위 시환경의 휘도 변화에 대한 인간 시각 특성의 변화 경향만이 연구^{[6],[18],[20]}되어 왔을 뿐, 이러한 인간 시각계의 색 순응 현상에 대해서는 기존에 제안된 모델이 없는 실정이다.

본 논문에서는 동일한 색도를 갖는 광원에서 휘도가 서로 다른 환경 하에서 디스플레이 장치를 사용할 때,

원 피사체의 색과 동일하게 보이는 대응색을 재현하는 동일 색도 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델인 CAM ΔY 를 제안하였다. 여기서 CAM은 색 순응 모델, ΔY 는 휘도의 차를 의미한다. 또한 제안한 CAM ΔY 를 이용하여 휘도 변화에 따른 백색의 변화 경향만을 모델링하여 디스플레이 장치의 기준 백색을 설정할 수 있는 등백색 상관색온도 곡선 (equal-whiteness CCT curve, EWC)도 제안하였다.

II. 인간 시각계의 색 순응 현상

사용자가 일반 가정이나 사무실에서 컬러 디스플레이 장치를 사용하는 경우, 주간에는 자연광 하에서 사용하나 자연광이 부족하거나 야간에는 백열등이나 형광등과 같은 조명광 아래에서 사용하게 된다. 따라서 일반 사용자가 보는 디스플레이에 재현된 색은 디스플레이 자체의 색에만 의존하지 않고 주위 조명광에 영향을 받게 되고, 사용자가 느끼는 디스플레이 상의 색감 변화는 주로 주위 조명광에 의한 주위의 색도 변화에 따른 인간 시각의 색 순응 현상에 기인한다. 이처럼 주위 시환경에 따라 인간 시각계가 순응하여 물리적으로 다른 색이 동일하게 보이는 인간 시각 특성을 색 순응 현상이라 하며, 이때 한 관찰자가 특정 시환경하에서 본 색 C_1 이 다른 시환경하에서 동일하게 보이는 색 C_2 를 대응색이라 한다.^{[3],[14]} 그러므로 주위 시환경에 의한 시각의 색 순응 현상을 고려하여 컬러 디스플레이 장치에서 재현되는 색의 자극치를 달리하면 동일 색으로 보이게 할 수 있다.

동일한 밝기를 갖고 색도가 서로 다른 시환경 하에서 동일하게 보이는 대응색을 예측하기 위한 색 순응 모델로는 von Kries^{[3],[16]}와 Breneman^[20] 모델 등과 같이 인간 시각의 비례 계수 비의 변화가 선형적으로 변화한다고 가정한 선형 순응 변환 모델과, Bartleson,^{[10],[17]} Fairchild,^{[3],[21],[22]} 및 MvK (Modified von Kries)^{[24],[25]} 모델 등과 같이 각 자극에 대한 비례계수의 비가 비선형적으로 발생한다고 가정한 비선형 변환 모델과 같이 여러 가지로 제안되어져 왔다. 하지만, 동일한 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 현상에 대해서 Hunt^[6]는 색 자극이 강할수록 인간이 지각하는 색감 (colorfulness)이 증가한다고 하였고, Bartleson^[18]은 주위 배경의 밝기가 어두워 질수록 관찰자가 느끼는 채도가 낮아진다고 하였다. 그리고, Breneman^[20]은 서로 다른 광원의 조건 하에서 관찰자의 각각의 눈이 서로 다른 광원에 순

응하도록 하는 색 순응 실험에서 동일한 색도의 광원 하에서 휘도가 서로 다른 상태에서도 인간 시각계는 색 순응 현상이 발생하고, 이에 의해 측색적으로 같은 색의 채도가 변화되며, 이와 더불어 백색의 색온도인 상관 색온도 또한 달리 보인다고 하였다. 이와 같이 휘도의 변화에 따른 색 순응 현상에 대해서는 경향성의 연구만 되어 왔을뿐, 이를 위한 색 순응 모델은 기존에 제안된 것이 없는 실정이다.

III. 동일 색도 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델 제안

우리가 생활하고 있는 실외 시환경은 아주 높은 휘도를 갖는 일광 (sunlight) 하의 상태이고, 이러한 실외 환경의 색온도인 하늘의 상관 색온도는 여러 연구자들에 의해서 많이 연구되어 왔다.^{[12],[13]} 이들 연구에 의하면 청명한 하늘 (clear sky)의 상관 색온도는 5500~6000 K 정도가 되고, 이 때 백색의 휘도는 10000 cd/m² 정도로 매우 높은 상태이다. 한편, 그림 1에서와 같이 실외의 시환경 하에서 화상을 촬영한 후 TV와 같은 디스플레이 장치를 통해 시청하게 되는 가정의 실내 시환경은 평균 휘도가 10 cd/m² 정도로 낮은 휘도의 조명 상태이다. 이러한 시환경의 휘도의 변화에 의해서 촬영시 원 화상과 디스플레이 장치에 재현된 화상은 색 순응 현상에 의해서 서로 상이하게 느껴질 것이다.

따라서 본 논문에서는 그림 1에 나타낸 것과 같이, 높은 휘도의 실외 시환경 상태에서 보는 전경과 이를 촬영한 후 동일한 상관 색온도의 실내 시환경에서 디스플레이 장치를 볼 경우에도 실외 촬영 장소에서의 피사체에 대한 색감과 동일한 색감을 느낄 수 있게 하기 위해서, 동일 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델인 CAM ΔY 를 제안하였다. 제안한 색 순응 모델 CAM ΔY 의 시환경 조건을 수식으로 나타내면

$$(x_1, y_1) = (x_1, y_1), \quad Y_1 \neq Y_2 \quad (1)$$

와 같다. 즉, 광원의 색도 좌표 xy 는 동일하고 휘도 Y 가 다른 시환경에 의한 색 순응 현상을 모델링 하였다.

제안한 색 순응 모델 CAM ΔY 는 그림 2에 나타낸 블록도와 같이 저휘도 상태의 시험 색 (test colors)과 동일하게 보이는 고휘도 상태의 대응색인 매칭 색 (matching colors)으로 변환하는 3x3 변환 행렬로 구성 하였으며, 구하는 자세한 과정을 수식으로 나타내면

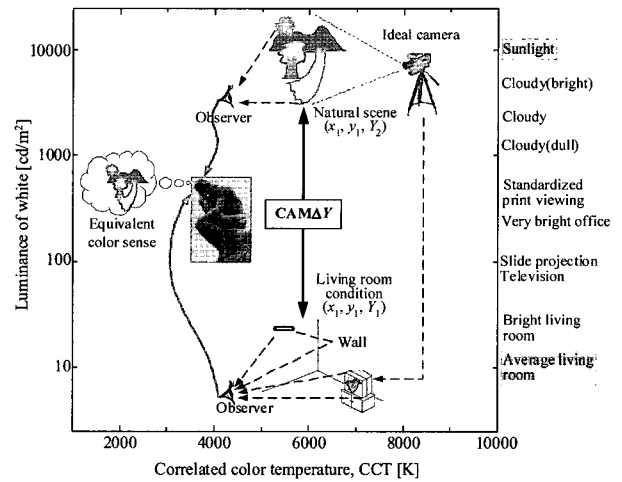


그림 1. 주위 시환경과 색순응 모델의 필요성 및 동일 색도 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델 제안

Fig. 1. The conditions of surround viewing conditions and necessity of chromatic adaptation model and the proposed chromatic adaptation model for the variations of the luminance of the same chromaticity illuminants.

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix}_{Y_1} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}_{Y_1}, \quad \begin{bmatrix} L_2 \\ M_2 \\ S_2 \end{bmatrix}_{Y_2} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix}_{Y_2}$$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.9182 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} L_2 \\ M_2 \\ S_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}_{\Delta Y} \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = [\mathbf{M}_{ij}]_{3 \times 3} \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$M_{ij} = a_{ij} + b_{ij} \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right) + c_{ij} \left(\frac{Y_2}{Y_1} \right)^2, \quad (Y_2 \geq Y_1) \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \mathbf{M}_{\Delta Y} \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

와 같다. 여기서, XYZ 는 3 자극치이고, LMS 는 시각 자극치이며, \mathbf{M} 은 Hunt-Pointer-Estevéz 변환^{[3],[21]}이다. 그리고 Y_1 및 Y_2 는 특정 시환경 하에서 피사체의 최대 백색의 휘도이며, Y_2 는 Y_1 보다 높은 휘도를 나타낸다. $\mathbf{M}_{\Delta Y}$ 는 동일 광원하에서 휘도의 변화에 따른 색 순응 현상을 위한 변환 행렬이고, 각 원소 (elements)는 식 (4)에서와 같이 두 가지 시환경의 최대 휘도 비에 대한 2차 함수로

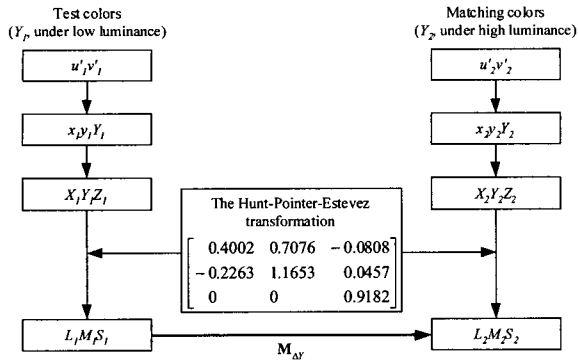


그림 2. 동일 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델 CAMΔY의 블록도

Fig. 2. A block diagram for chromatic adaptation model, CAMΔY, for the variations of the luminance of the same chromaticity illuminants .

모델링하였다. 이 변환 행렬의 각 원소는 Breneman의 실험 데이터로부터 최소 오차가 되도록 하는 값을 구하였고, 변환 행렬의 각 원소 함수의 계수 값은 표 1에서와 같다.

제안한 색 순응 모델 CAMΔY의 변환 행렬 MΔY는 정방 행렬로써 이의 역행렬을 이용하면 휘도가 높은 밝은 시환경에서 휘도가 낮은 어두운 시환경으로의 변환도 쉽게 할 수가 있고, 휘도 비의 2차 함수로 모델링한 변환 행렬 MΔY의 각 원소는 시환경이 결정되면 상수가 됨으로써 디스플레이 장치에 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

IV. 실험 및 고찰

1. 색 재현 오차에 대한 평가

제안한 CAMΔY의 성능 평가로 Breneman의 색 순응 실험에 의해 구한 대응색 데이터와 제안 모델에 의한 예측색에 대한 색 재현 오차를 비교 평가하였다. CIE u'v' 좌표계에서 제안한 CAMΔY에 의한 예측색과 Breneman의 실험에 의한 대응색인 매칭 색과의 측색적 좌표 오차는

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

으로 계산하였다. 그리고 CIE L*u*v* 좌표계를 이용하여 휘도 Y 성분을 고려한 색 재현 오차는

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{\left(\frac{L_m^* - L_p^*}{4}\right)^2 + (u_m^* - u_p^*)^2 + (v_m^* - v_p^*)^2} \quad (7)$$

표 1. 동일 광원의 휘도 변화에 따른 색 순응 모델 CAMΔY의 변환 행렬 MΔY 각 원소 함수의 계수 값

Table 1. Element functions' coefficients of the transfer matrix MΔY of chromatic adaptation model, CAMΔY, for the variations of the luminance of the same chromaticity illuminants.

M _{ij}	a _{ij}	b _{ij}	c _{ij}
M ₁₁	0.2254	0.7691	0.0056
M ₁₂	-0.1966	0.1993	-0.0026
M ₁₃	-0.0186	0.0197	-0.0012
M ₂₁	-0.1275	0.1306	-0.0031
M ₂₂	0.1112	0.8873	0.0015
M ₂₃	0.0104	-0.0112	0.0007
M ₃₁	0.6355	-0.6743	0.0388
M ₃₂	-0.8223	0.8645	-0.0422
M ₃₃	0.2089	0.7989	-0.0077

로 구하였다.^[4] 여기서 L_p^{*}와 (u'_p, v'_p) 및 (u_p^{*}, v_p^{*})는 제안한 모델에 의한 예측색의 휘도와 색도 좌표를, L_m^{*}과 (u'_m, v'_m) 및 (u_m^{*}, v_m^{*})은 Breneman 실험의 대응색의 색도 좌표를 나타낸다. 그리고 식 (7)의 휘도 값에 1/4이 곱해진 이유는 TV와 같은 컬러 디스플레이 장치에서는 색 재현 오차 계산 시에 휘도에 대한 가중치를 1/4로 줄이는 것이 좋다고 알려져 있기 때문이다.^[26]

제안 모델에 의한 예측색과 Breneman의 색 순응 실험에 의해 구한 대응색 데이터 간의 측색적 좌표 오차와 색 재현 오차는 각각 표 2에서와 같다. 여기서 Breneman의 D55 광원 하의 3 가지 서로 다른 휘도에 대한 실험의 대응색 데이터와 제안한 CAMΔY에 의해 예측된 색과의 평균 측색적 좌표 오차 Δu'v'의 값이 0.0044 정도가 된다. 그리고 u'v' 좌표계에서 인접한 (adjacent) 두 컬러 샘플간의 색차가 0.004 Δu'v' ≥ 0.004 일 때 시각적으로 구분 가능하고, 떨어져 있는 (separated) 두 컬러 샘플인 경우에는 Δu'v' ≥ 0.04이면 두 컬러 샘플의 차이를 감지하게 된다고 알려져 있다.^[2] 이와 제안한 CAMΔY의 평균 측색적 좌표 오차를 비교해 보면, 제안한 모델의 예측 오차가 인접한 두 샘플이 겨우 구별이 되는 정도로 그 성능이 매우 좋다고 할 수 있다.

Breneman의 색 순응 실험에 의해 구한 대응색 데이터와 제안 모델에 의한 한 예측색들을 색도 좌표로 나타내면 그림 3에서와 같으며, 제안한 CAMΔY에 의한 예측색이 Breneman 실험의 대응색과 거의 같은 위치의

표 2. 제안한 CAMΔY의 평균 측색적 좌표 오차 및 색 재현 오차

Table 2. Chromaticity errors and color reproduction errors of the proposed CAMΔY.

Illuminant, D ₅₅	Luminance of white					
	15 to 270 cd/m ²		130 to 2120 cd/m ²		850 to 11100 cd/m ²	
Sample colors	$\overline{\Delta u'v'}$	ΔE_{uv}^*	$\overline{\Delta u'v'}$	ΔE_{uv}^*	$\overline{\Delta u'v'}$	ΔE_{uv}^*
Gray	0.0021	1.6705	0.0019	1.4926	0.0052	4.0672
Red	0.0055	2.8043	0.0025	1.2217	0.0133	6.8898
Skin	0.0040	3.0674	0.0009	0.6946	0.0056	4.3729
Orange	0.0015	1.1939	0.0094	7.3122	0.0020	1.5488
Brown	0.0072	3.7779	0.0032	1.6736	0.0041	2.0884
Yellow	0.0039	3.0491	0.0064	4.9344	0.0054	4.1548
Foliage	0.0078	4.0745	0.0021	1.0804	0.0028	1.4467
Green	0.0062	3.2556	0.0035	1.8098	0.0047	2.4362
Blue-green	0.0017	1.3457	0.0039	3.0171	0.0007	0.5564
Blue	0.0044	2.3006	0.0069	3.6508	0.0121	6.3074
Sky	0.0014	1.0747	0.0013	0.9858	0.0050	3.8708
Purple	0.0049	2.5539	0.0037	1.9446	0.0024	1.2531
Average	0.0042	2.5149	0.0038	2.4848	0.0053	3.2494

색도 좌표에 재현되고 있어 예측 성능이 매우 좋음을 알 수 있다. 다음으로 Breneman의 대응색 데이터와 제안 모델에 의한 예측색들의 R, G, 및 B 값을 구하여 실제 화상으로 만들어 보면 그림 4에서와 같고, 이를 실제 디스플레이 장치에 재현하여 비교 평가해 보았다. 평가 결과, 제안한 CAMΔY에 의해 예측된 화상이 Breneman의 D₅₅ 광원 하의 3 가지 서로 다른 휘도에 대한 색 순응 실험에서의 대응색의 화상과 거의 동일하게 보임을 알 수 있었다.

2. 등백색 상관 색온도 곡선 모델링

본 논문에서 제안한 색 순응 모델인 CAMΔY는 동일한 색도의 주위 시환경의 휘도 변화에 따른 인간 시각계의 색 순응 현상에 의해 변화되는 백색을 비롯한 모든 색의 변화 경향을 모델링 하였다. 여기서 디스플레이 장치의 기준 백색 설정을 위해서, 제안한 CAMΔY에 의한 백색만의 변화 경향성을 파악함으로써 동일한 색도의 백색이 휘도 변화에 따라 같은 백색으로 느껴지는 상관 색온도의 변화 특성을 모델링하였다. 색도 좌표 xy로부터 상관 색온도로의 변환은

$$CCT = 437n^3 + 3601n^2 + 6831n + 5517$$

$$n = (x - 0.3320)/(0.1858 - y) \tag{8}$$

와 같고,^[20] 여기서 CCT는 상관 색온도이다.

동일한 색도의 백색 광원의 휘도 변화에 따른 상관 색온도의 변화를 모델링하는 과정은 다음과 같다. 먼저

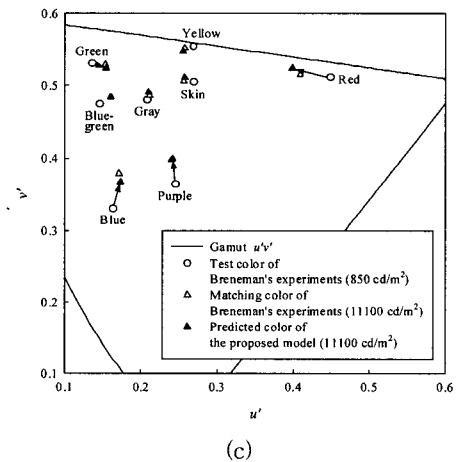
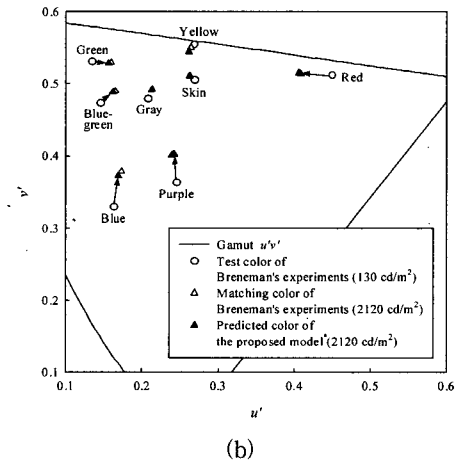
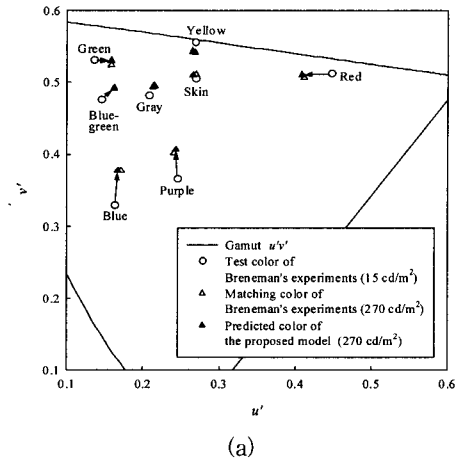


그림 3. 제안한 모델에 의한 예측색: D₅₅ 광원의 (a) 15와 270 cd/m², (b) 130과 2120 cd/m², (c) 850과 11100 cd/m²

Fig. 3. Predicted colors by the proposed model: (a) 15 and 270 cd/m², (b) 130 and 2120 cd/m², (c) 850 and 11100 cd/m² of illuminant D₅₅.

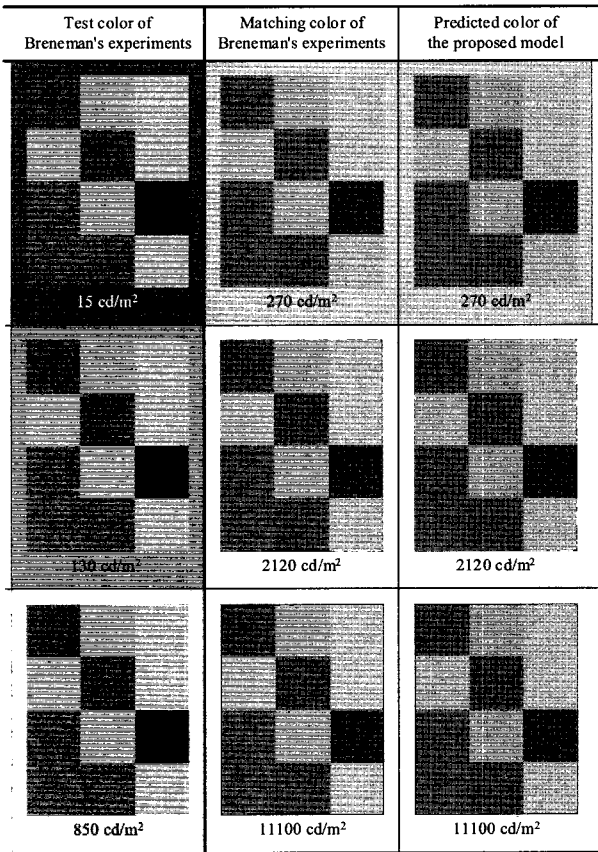


그림 4. 제안한 CAMΔY에 의한 예측색 비교
Fig. 4. Comparison of predicted colors by the proposed CAMΔY.

제안한 CAMΔY를 이용하여 Breneman의 색 순응 실험의 그레이 패턴의 변화 경향과 동일한 휘도의 비를 이용하여 같은 백색으로 보이는 변화 경향을 추정해서 구하여 휘도 Y에 대한 함수로 나타내면

$$\begin{aligned}
 EWC_1 &= 6914.4171 - 1161.5292 \log Y + 131.9550 (\log Y)^2 \\
 EWC_2 &= 7635.9579 - 1340.6432 \log Y + 154.2210 (\log Y)^2 \quad (9) \\
 EWC_3 &= 5942.9847 - 901.6707 \log Y + 100.6104 (\log Y)^2
 \end{aligned}$$

와 같은 3 개의 등백색 상관 색온도 곡선 (equal-whiteness CCT curve, EWC)을 구할 수 있다. 다음으로 식 (9)로부터 동일한 백색으로 보이는 휘도 변화에 따른 등백색 상관 색온도 곡선을 일반화하면

$$EWC = b_0 + b_1 \log Y + b_2 (\log Y)^2 \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 b_0 &= -8.20453 \times 10^3 + 4.79652 (CCT_{Y=10000}) - 3.06965 \times 10^{-4} (CCT_{Y=10000})^2 \\
 b_1 &= 3.71908 \times 10^3 - 1.68595 (CCT_{Y=10000}) + 1.30504 \times 10^{-4} (CCT_{Y=10000})^2 \\
 b_2 &= -4.16987 \times 10^2 + 0.18421 (CCT_{Y=10000}) - 1.34406 \times 10^{-5} (CCT_{Y=10000})^2
 \end{aligned} \quad (11)$$

와 같이 된다. 여기서 $CCT_{Y=10000}$ 는 휘도 10000 cd/m² 일

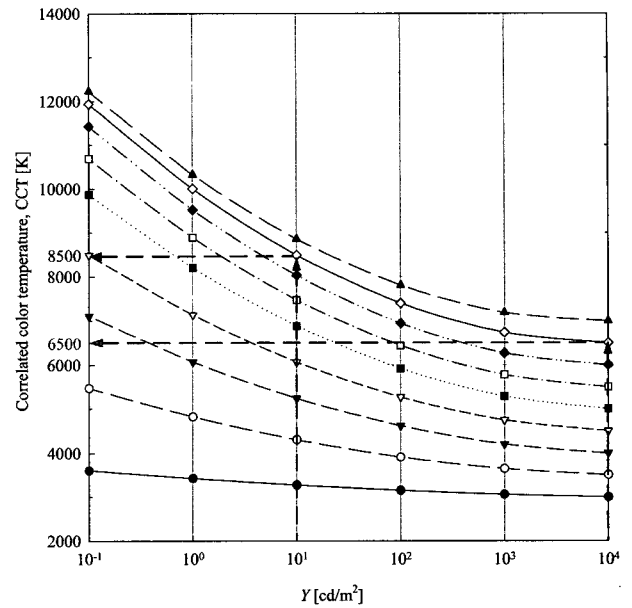


그림 5. 제안한 등백색 상관 색온도 곡선
Fig. 5. Proposed equal-whiteness CCT curves (EWCs).

때 백색의 상관 색온도이다. 휘도 10000 cd/m²의 백색을 기준으로 설정한 이유는 그림 1에 나타난 것과 같이 일광 하의 시환경에서 백색의 휘도가 10000 cd/m²이기 때문에 이런 일광 하의 백색과 동일하게 보이는 휘도 변화에 따른 상관 색온도를 구하기 위해서 설정하였다. 제안한 등백색 상관 색온도 곡선을 여러 가지 상관 색온도에 대해서 나타내면 그림 5에서와 같다.

NTSC 컬러 TV 수상기는 표준 제정 초기에는 기준 백색 (reference white)을 6770 K 로 제조되었으나, 1958년도 이후 미국 및 일본의 TV 제조업자들 중심으로 기준 백색을 9300 K + 27 MPCD (minimum perceptible color difference)로 정하여 생산되어 왔다.^{[27],[28]} 그러나 요즘 시판되는 대부분의 TV 수상기에서는 NTSC에서 정한 백색의 표준 색온도보다 높은 10000 K 이상으로 기준 백색을 정하고 있다. 이와 같이 TV 제조업자들의 경험에 의해 컬러 디스플레이 장치의 기준 백색이 NTSC TV 표준과 다르게 높은 상관 색온도로 선택된 이유를 그림 5의 제안한 등백색 상관 색온도 곡선을 이용하면 해석이 가능해진다. 즉, 일반적인 일광 하 외부 시환경의 휘도인 10000 cd/m²의 높은 휘도에 디스플레이 장치의 기준백색으로 많이 사용되는 6500 K의 상관 색온도의 백색과 동일한 색감을 느끼기 위해서는, 제안한 등백색 상관 색온도 곡선에서 약 8500 K의 백색이 되어야 함을 알 수 있다. 여기에 기존의 실험적인 연구에 의하면 TV의 기준 백색의 색온도는 주위 조명광보다 3000~4000 K 정도 높게 설정

하는 것이 좋다고 알려져 있다.^[29] 따라서 일광 하의 백색과 같은 색감을 느끼기 위해서는 디스플레이의 기준 백색을 10000 K 정도로 설정해야 한다. 이와 같이 제안한 등백색 상관 색온도 곡선은 디스플레이 장치의 기준 백색을 설정하는 정량적인 기준을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 동일 광원에서 휘도가 다른 시환경 하에서 컬러 디스플레이 장치를 사용할 때 발생하게 되는 휘도 차에 의한 색 순응 현상을 고려하여 원 피사체와 동일하게 보이는 대응색을 재현할 수 있는 색 순응 모델 CAM ΔY 를 제안하였다. 제안한 모델은 저휘도 상태의 시험 색과 동일하게 보이는 고휘도의 상태의 대응색으로 변환하는 변환 행렬로 모델링하였고, Breneman이 실험한 주위 휘도별 대응색 데이터들로부터 최적의 계수를 구하였다. 제안한 색 순응 모델의 변환 행렬은 주위 시환경이 결정 되면 자극치 비의 이득이 선형 함수인 3×3 정방 행렬이 되어 컬러 디스플레이 장치에 쉽게 적용할 수가 있는 장점이 있다.

CAM ΔY 의 성능을 평가해 본 결과, Breneman의 D₆₅ 광원의 세 가지 서로 다른 밝기에 대한 실험의 대응색과 제안한 모델에 의해 예측된 색과의 평균 측색적 좌표 오차 $\overline{\Delta u'v'}$ 의 값이 0.004 정도로, 이는 제안한 모델의 예측 성능이 인접한 두 컬러 샘플을 겨우 구별할 수 있는 정도로 성능이 매우 좋다고 할 수 있다. 또한 제안한 CAM ΔY 를 이용하여 동일 광원의 밝기에 따른 동일한 백색으로 보이는 등백색 상관 색온도 곡선을 제안하였다. 제안한 등백색 상관 색온도 곡선은 이제까지 TV 제조업자들의 경험에 의해 결정된 디스플레이 장치의 기준 백색을 설정하는 정량적인 기준으로 사용할 수 있을 것이다.

차후 연구 과제로는 본 논문에서 제안한 동일 색도 시환경의 색도 변화에 따른 색 순응 모델인 CAM ΔY 는 Munsell 값 5를 기준으로 한 모델이므로 주변 시환경의 밝기에 따라 비선형적인 특성을 가지고 있는 인간 시각계의 감마 특성을 고려하기 위해서는 제안 모델이 적용되지 않은 더 밝은 영역과 어두운 영역에서의 색 순응 모델에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다. 그리고 색 순응 모델에 의한 대응색 재현과 더불어 일반 시청자가 좋아하는 기호를 만족시키기 위한 백색, 살색,

및 녹색 등의 선호색 재현 방법을 동시에 고려하는 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] D. M. Purdy, "Spectral hue as a function of intensity," *Am. J. of Psych.*, vol. 43, pp. 541-559, 1931.
- [5] M. D. Fairchild and E. Pirrotta, "Prediction the lightness of chromatic object colors using CIELAB," *Color Res. Appl.*, vol. 16, pp. 385-393, 1991.
- [6] R. W. G. Hunt, "Light and dark adaptation and the perception of color," *J. of Opt. Soc. Am.*, vol. 42, pp. 190-199, 1952.
- [7] H. Helson, "Fundamental problem in color vision. I. The principle governing changes in hue, saturation, and lightness of non-selective samples in chromatic illumination," *J. of Exp. Psych.*, vol. 23, pp. 439-477, 1938.
- [8] J. C. Stevens and S. S. Stevens, "Brightness functions: Effects of adaptation," *J. of Opt. Soc. Am.*, vol. 53, pp. 375-385, 1963.
- [9] M. D. Fairchild, "Considering the surround in device-independent color imaging," *Color Res. Appl.*, vol. 20, pp. 352-363, 1995.
- [10] C. J. Bartleson, "Predicting corresponding colors with changes in adaptation," *Color Res. Appl.*, vol. 4, pp. 143-155, Fall 1979.
- [11] C. A. Poynton, *A Technical Introduction to Digital Video*, John Wiley & Sons, pp. 85-86, 1996.
- [12] E. R. Dixon, "Spectral distribution of Australian daylight," *J. of Opt. Soc. Am.*, vol. 68, pp. 437-450, 1978.
- [13] J. Hernandez-Andres, J. Romero, and J. L. Nieves, "Color and spectral analysis of daylight in southern Europe," *J. of Opt. Soc. Am.*, vol. 18, pp. 1325-1335, 2001.
- [14] 송규익, *색채 디스플레이 공학*, 도서출판 화성, 대구, 2002.
- [15] G. Wyszecki and W. S. Stiles, *Color Science*:

- Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*, John Wiley & Sons, New York, 1982, pp. 117-451.
- [16] D. L. MacAdam, *Color Measurement*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, 1981, pp. 200-208.
- [17] C. J. Bartleson, "Comparison of chromatic-adaptation transforms," *Color Res. Appl.*, vol. 3, pp. 129-136, Fall 1978.
- [18] C. J. Bartleson, "Changes in color appearance with variations in chromatic adaptation," *Color Res. Appl.*, vol. 4, pp. 119-138, Fall 1979.
- [19] 최덕규, "시각계 색 순응을 고려한 텔레비전 수상기에서의 색 재현," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 1997년 6월.
- [20] 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.
- [21] M. D. Fairchild, "A model of incomplete chromatic adaptation," *Proc. the 22nd Session of the CIE*, Melbourne, pp. 33-34, 1991.
- [22] M. D. Fairchild, "Formulation and testing of an incomplete-chromatic-adaptation model," *Color Res. Appl.*, vol. 16, pp. 243-250, 1991.
- [23] CIE TC1-34 Final Report, *The CIE 1997 Interim Colour Appearance Model (Simple Version)*, CIECAM97s, 1998.
- [24] 권용대, "조명에 따른 디스플레이 대응색 재현 모델," *경북대학교 전자공학과 박사학위논문*, 2001년 12월.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] C. B. Neal, "Television colorimetry for receiver engineers," *IEEE Trans. BTR*, vol. BTR-19, pp. 149-162, Aug. 1973.
- [28] C. J. Hirsch, "The chromaticity of reference white in color television," *J. of SMPTE*, vol. 77, pp. 702-713, July 1968.
- [29] 大西地, "カラーテレビにおける好みの白測定," *テレビ全大*, pp. 15-16, 1976.

 저 자 소 개



김 은 수(학생회원)
제 41권 SP편 제 2호 참조



장 수 옥(학생회원)
제 41권 SP편 제 2호 참조



이 성 학(학생회원)
1997년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업.
1999년 경북대학교 전자공학과
석사 졸업.
1999년~2004년 LG전자 영상제품
연구소 선임연구원.

2004년~현재 경북대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야 : 화질개선, DTV시스템, 영상신호
처리>



송 규 익(정회원)
제 41권 SP편 제 2호 참조