

컬러 어피어런스 모델의 구조 및 특성

The Structure and Feature of Color Appearance Models

허태욱(T.W. Heo) 컬러이미징연구팀 연구원
김진서(J.S. Kim) 컬러이미징연구팀 선임연구원
조맹섭(M.S. Cho) 컬러이미징연구팀 책임연구원, 팀장

컬러 디스플레이의 색재현 특성을 좋게 하는 것은 전세계 소비자들의 공통된 바람이다. 이를 위해서, 컬러 재현 장치에서 장치 독립적인 컬러 이미징 기술의 개발이 필요하다. 이를 뒷받침하는 기술은 컬러 어피어런스 모델(color appearance models)을 이용한 컬러의 재현능력 향상인 것이다. 따라서, 본 고에서는 컬러 어피어런스 모델의 최신 기술 동향, 색순응 변환에 있어서의 최신 기술 및 컬러의 차이를 정확히 나타내는 색오차식의 최신 기술을 소개하고자 한다.

I. 서론

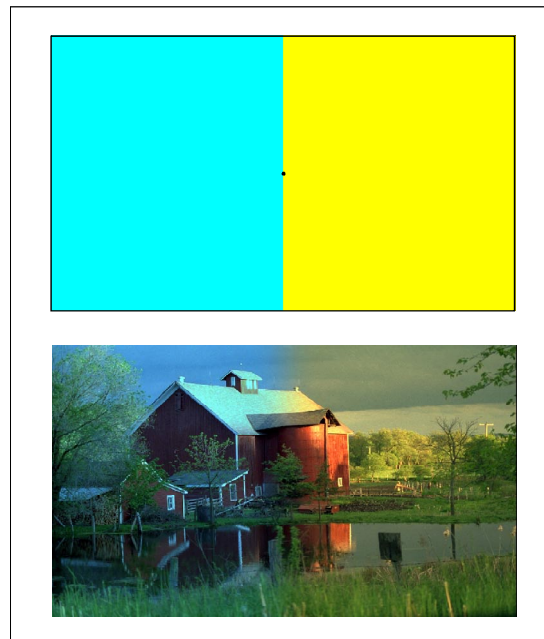
디스플레이 산업의 도약적인 발전으로 컬러 디스플레이의 환경에 접하지 않는 사람은 없다. 휴대폰에서도 컬러, 모든 디스플레이 장치에서도 컬러가 중요한 요소이다. 주위 환경의 변화에 따른 컬러의 재현성을 높이고, 장치 독립적인 컬러 이미징 기술을 구현하기 위해서는 성능이 좋은 컬러 어피어런스 모델의 개발이 절실하다. 세계적인 컬러 어피어런스 모델의 최신 기술 동향 및 발전 방향에 대해서 정리하였다.

현상이 나타난다. 색순응 현상은 컬러 어피어런스 모델의 필수적인 요소이다.

II. 컬러 어피어런스 모델

1. 개요

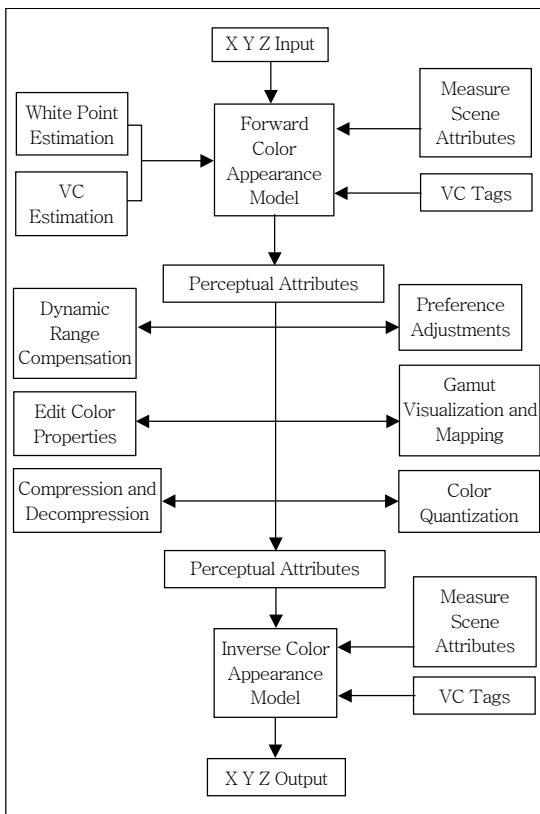
컬러 어피어런스 모델에 대한 설명에 들어가기 전에 (그림 1)에서 간단한 색순응 현상(chromatic adaptation)의 예를 들었다[1]. 30초 동안 위쪽의 이미지에서 청색과 황색 사이의 검은 점을 응시한 다음 아래쪽의 이미지를 보면 이미지에 대한 색순응



(그림 1) 색순응 현상의 예

2. 컬러 어피어런스 모델의 정의

컬러 어피어런스 모델이란 간단히 말해서 명도(lightness), 채도(chroma), 색상(hue) 등의 자극치에 대해 다양한 주위 환경에 따른 어피어런스를 예측하기 위한 기본적인 색체계(colorimetry)를 확장한 것이다. 즉, 다양한 주위 환경에 따른 변화에 기인한 시각적 반응의 변화를 설명하는 것이다. (그림 2)에 현재 표준인 CIECAM97s에 대한 일반적인 흐름도를 나타내었다[2].

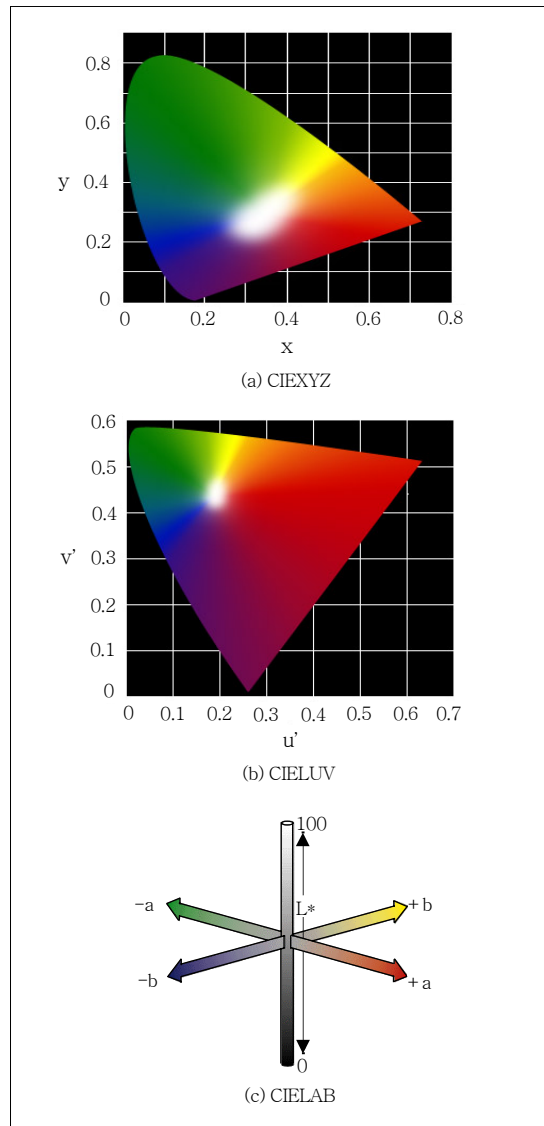


(그림 2) CIECAM97s의 일반적인 흐름도

3. 컬러 어피어런스 모델의 역사

1970년대에는 CIELAB와 CIELUV가 표준으로 제정되었다. 이 모든 것은 1931년 CIEXYZ를 바탕으로 이루어지고 있다. (그림 3)에서는 CIE에서 제안한 컬러 공간들에 대해 보여주고 있다[3]. 그리

고 1980년대에 들어와서는 Hunt와 Nayatani에 의해 개발되고 개정되었으며, 1990년대에 들어서는 RLAB, LLAB 등의 새로운 모델이 출현하였고, 이전의 모델에 대한 테스트가 활발하였다. 이어 1990년대 후반기에는 이러한 요구들을 수렴하여 CIE-CAM97s를 표준으로 제정하였다. 또한 2000년대에 들어와서는 이 모델에 대한 테스트와 재 개정 절차가 진행중이며, 곧이어 CIECAM02 모델이 나올 것이다.



(그림 3) 여러 가지 컬러 공간들

4. CIECAM97s

CIECAM97s는 컬러 관련 국제조명기구(CIE, Commission Internationale DE L'Eclairage)의 분과위원회 TC1-34에서 제안된 1997년의 국제 표준 컬러 어피어런스 모델이다. 최근에 연구한 실험결과와 계속되는 제안으로 계속 개정되고 있는 실정이다. 최초로 1997년 가장 간단한 버전인 CIECAM97s이 탄생한 이후로 계속되는 개정이 필요한 것이다. 최근 연구되고 있는 최신 버전의 CIECAM97s에 대해서 설명하고자 한다.

가. CIECAM97s의 탄생

1996년 3월 비엔나에서 처음으로 CIE 전문 심포지엄이 개최되었다. CIE에서는 분과 TC-8(image technology)의 형성을 이루었고, 이 분과 위원회에서 컬러 어피어런스 모델 최초 버전인 CIECAM97s를 탄생시켰다. 이는 컬러 과학 및 컬러 이미징 분야의 각계 연구자들이 하나의 컬러 어피어런스 모델을 가지는 것에 동의하였기 때문이다. 그러나 CIECAM97s는 여전히 실제 응용 분야에서는 편재(ubiquitous)하지 않았고, 구현이 복잡하다는 단점이 있었다. 이 후 CIE는 분과 위원회 TC8-1(color appearance modeling for colour management applications)을 탄생시켰고, 이 위원회에서 컬러 어피어런스 모델에 대한 요소 중 색 순응 변환 및 채도 범위 확장성(chroma scale expansion), 연속 가변 환경 요소(continuously variable surround)의 연구 결과를 바탕으로 CIECAM97s의 개정안을 제안하고 있다[4],[5].

나. CIECAM97s의 특징

먼저 CIECAM97s의 형성은 컬러 어피어런스 영역의 많은 연구원들의 업적에 기초하고 있다는 것이 중요한 점이다. Bartleson, Breneman, Fairchild, Estevez, Hunt, Lam, Luo, Nayatani, Rigg, Seim, 및 Valberg 등이 다양한 모델을 제안하였다.

컬러 어피어런스 모델은 3가지 단계로 요약할 수

있다. 색순응 변환(chromatic adaptation transform), 동적 반응 함수(dynamic response function), 지각을 균등히 나타낼 수 있는 컬러 공간 변환(color space conversion)이다. 다음 절에서는 컬러 어피어런스 모델을 사용하기 위한 기본 입력 데이터와 컬러 어피어런스 모델의 절차에 대해 색순응 변환 및 색순응 상호 관계에 대해 설명한다.

1) 입력 데이터

CIECAM97s의 주위 환경 및 순응 인자에 대한 입력 데이터들은 다음과 같다.

- ① L_A : 순응 영역 휘도(adapting field luminance)(통상 순응 영역의 백색 휘도의 20%)
- ② XYZ : 원천 조건(source condition)에서 측정된 샘플의 상대 삼자극치(relative tristimulus)
- ③ $X_W Y_W Z_W$: 원천 조건에서 원천 백색의 상대 삼자극치
- ④ Y_b : 원천 조건에서 원천 배경의 상대 휘도
- ⑤ c : 주위 환경 영향 상수(impact of surround)
- ⑥ N_c : 색 감응 인자(chromatic induction factor)
- ⑦ F_{LL} : 명도 대비 인자(lightness contrast factor)
- ⑧ F : 순응량 판단 인자(factor for degree of adaptation)

<표 1>에서는 주위 환경에 다른 CIECAM97s의 파라미터들을 나타내었다. CIE 삼자극치는 CIE 1931년 표준 컬러 관찰자 2°의 자료를 사용해서 얻어지며, 배경(background)은 관심 영역의 자극치에 인접한 영역으로 정의되며, 주위 환경은 시감 시야

<표 1> 주위 환경에 따른 CIECAM97s의 파라미터들

관찰 조건	c	N_c	F_{LL}	F
Average Surround, Samples Subtending >4°	0.69	1.0	0.0	1.0
Average Surround	0.69	1.0	1.0	1.0
Dim Surround	0.59	1.1	1.0	0.9
Dark Surround	0.525	0.8	1.0	0.9
Cut-Sheet Transparencies (on a viewing box)	0.41	0.8	1.0	0.9

의 나머지 부분으로 정의된다.

순응 영역 휘도값이 통상 순응 영역의 백색 휘도의 20%보다 크거나 같으면 평균 상태(average)이고, 20%보다 작으면 어두운 상태(dim)이고, 0%이면 깜깜한 상태(dark)이다.

2) 색순응

색순응 변환은 소스 시야 조건으로부터 동등 에너지 조명 참조 시야 조건으로 바뀌는 것으로 사용된다. 먼저 샘플과 백색의 삼자극치로 표준화시키고 스펙트럼적으로 주위 환경에 맞게 콘의 반응을 변환하였다. Von Kries의 모델을 약간 변형시킨 모델을 사용하여 CIECAM97s의 변환에 이용하였다. 색순응 변환식은 (1), (2)에 나타나 있다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_B \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_B = \begin{bmatrix} 0.8951 & 0.2664 & -0.1614 \\ -0.7502 & 1.7135 & 0.0367 \\ 0.0389 & -0.0685 & 1.0296 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$M_B^{-1} = \begin{bmatrix} 0.9870 & -0.1471 & 0.1600 \\ 0.4323 & 0.5184 & 0.0493 \\ -0.0085 & 0.0400 & 0.9685 \end{bmatrix}$$

완전한 색순응 상태가 되면 D값은 1이 되고, 어떠한 순응도 되지 않으면 D값은 0이 된다. D의 값은 다양한 주위 조건과 휘도 레벨에 따른 (7)로 계산할 수 있다. 또한, B가 음수면 B_c도 음수가 된다.

$$R_c = [D(1.0/R_w) + 1 - D]R \quad (3)$$

$$G_c = [D(1.0/G_w) + 1 - D]G \quad (4)$$

$$B_c = [D(1.0/B_w^p) + 1 - D]B^p \quad (5)$$

$$p = (B_w/1.0)^{0.0834} \quad (6)$$

$$D = F - F/[1 + 2(L_A^{1/4}) + (L_A^2)/300] \quad (7)$$

다양한 팩터들이 (8)~(12)까지 계산된다.

$$k = 1/(5L_A + 1) \quad (8)$$

$$F_L = 0.2k^4(5L_A) + 0.1(1 - k^4)^2(5L_A)^{1/3} \quad (9)$$

$$n = Y_b/Y_w \quad (10)$$

$$N_{bb} = N_{cb} = 0.725(1/n)^{0.2} \quad (11)$$

$$z = 1 + F_{LL}n^{1/2} \quad (12)$$

n: 배경 감응 인자(background induction factor)
N_{bb}, N_{cb}: 배경 밝기 감응 인자, 색 밝기 감응 인자 (background and chromatic brightness induction factors)

z: 기초 지수 비선형 상수(base exponential non-linearity)

(13), (14)는 Hunt-Pointer-Estevéz의 콘 반응 변환 행렬이다.

$$\begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = M_H M_B^{-1} \begin{bmatrix} R_c Y \\ G_c Y \\ B_c Y \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$M_H = \begin{bmatrix} 0.38971 & 0.68898 & -0.07868 \\ -0.22981 & 1.18340 & 0.04641 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$M_H^{-1} = \begin{bmatrix} 1.9102 & -1.1121 & 0.2019 \\ 0.3710 & 0.6291 & 0.00 \\ 0.00 & 0.00 & 1.00 \end{bmatrix}$$

후 순응 콘 반응이 (15)~(17)을 이용하여 계산된다.

$$R'_a = \frac{40(F_L R'/100)^{0.73}}{[(F_L R'/100)^{0.73} + 2]} + 1 \quad (15)$$

$$G'_a = \frac{40(F_L G'/100)^{0.73}}{[(F_L G'/100)^{0.73} + 2]} + 1 \quad (16)$$

$$B'_a = \frac{40(F_L B'_a / 100)^{0.73}}{[(F_L B'_a / 100)^{0.73} + 2]} + 1 \quad (17)$$

3) 어피어런스 상호 관계들(Appearance Correlates)

예비적인 적녹 성분 및 황청 성분이 (18), (19)로 계산될 수 있다.

$$a = R'_a - 12G'_a / 11 + B'_a / 11 \quad (18)$$

$$b = (1/9)(R'_a + G'_a - 2B'_a) \quad (19)$$

CIECAM97s의 hue 각도는 (20)으로 계산된다.

$$h = \tan^{-1}(b/a) \quad (20)$$

Hue 4각분법에 의한 H와 이심률 팩터 e를 h의 선형 보간법으로 계산할 수 있다.

Red : h= 20.14, e= 0.8, H= 0 or 400,

Yellow : h= 90.00, e= 0.7, H= 100,

Green : h= 164.25, e= 1.0, H= 200,

Blue : h= 237.53, e= 1.2, H= 300

선형 보간 방법에 의한 수식이 (21), (22)에 나타나 있다.

$$e = e_1 + (e_2 - e_1)(h - h_1)/(h_2 - h_1) \quad (21)$$

$$H = H_1 + \frac{100(h - h_1)/e_1}{(h - h_1)/e_1 + (h_2 - h)/e_2} \quad (22)$$

무채 반응(achromatic response)은 (23)으로 계산된다.

$$A = [2R'_a + G'_a + (1/20)B'_a - 2.05]N_{bb} \quad (23)$$

CIECAM97s의 명도 J는 무채 샘플값 A와 무채 백색 A_w 로 (24)에 의해 계산된다.

$$J = 100(A/A_w)^{0.42} \quad (24)$$

CIECAM97s의 밝기 Q는 CIECAM97s의 명도와 무채 백색에 의한 (25)에 의해 계산된다.

$$Q = (1.24/c)(J/100)^{0.67}(A_w + 3)^{0.9} \quad (25)$$

마지막으로 CIECAM97s의 포화도 s, CIECAM97s의 채도 C, CIECAM97s의 선명도 M은 각각 (26)~(28)로 계산된다.

$$s = \frac{50(a^2 + b^2)^{1/2}100e(10/13)N_c N_{cb}}{R'_a + G'_a + (21/20)B'_a} \quad (26)$$

$$C = 2.44s^{0.69}(J/100)^{0.67n}(1.64 - 0.29^n) \quad (27)$$

$$M = CF_L^{0.15} \quad (28)$$

(그림 4)에서는 주변 광원에 따른 CIECAM97s를 적용한 결과에 대해 나타내었다. 그림에서 나타나는 주변광에 따른 변화에 이미지가 순응하는 모습을 알 수 있다. 여기서는 간단히 주변광원의 효과만을 나타내었다.

다. CIECAM97s의 현재 및 전망

1997년 5월 교토에서 열린 CIE 기술분과위원회에서 CIECAM97s가 제정된 이후로 많은 각종 논문을 통해 수정된 모델들이 발표되고 있다. 그 중 최근 업적 중에 Li에 의한 개정안과 Fairchild에 의한 개정안 및 Luo에 의한 개정안들이 계속 발표되었다. 그 내용들을 간단히 정리하면 다음과 같다[6]-[9].

○ C.J. Li에 의해 1999년 제안된 안

- 무채 반응식에서의 노이즈 팩터값을 2.05에서 3.05로 바꾼 것
- 어두운 상태의 주위 환경에서 Nc값을 1.1에서 0.95로 바꾼 것

○ Fairchild에 의해 2001년 제안된 안

- 연속적인 배경 조건 보상법 c, Nc의 선형 보간법
- 색순응 변환에서 청색 채널의 지수 함수를 제거하고 최적화 행렬 재구성
- 모든 분야에 대해 FLL값을 1.0으로 셋팅
- 재 수정된 chroma 단계



(그림 4) 컬러 어피어런스 모델을 적용한 예

- Luo에 의해 2002년 제안된 안
- 약간 향상된 선명도(colorfulness) 단계
- 약간 향상된 밝기(brightness) 단계
- 약간 향상된 포화도(saturation) 지시자
- CMCCAT2000 행렬 사용

이 모든 내용을 포함하고 정리하여 2002년 TC8-1 분과 위원회에서는 CIECAM02 모델의 표준화 작업을 추진중이다. 수정된 안에는 지속적으로 색순응 변환에서의 선형 변환 특성과 컬러 어피어런스

스 상관 관계 및 채도 범위 확장성 등의 요소들이 들어갈 것이다. 보다 쉬워지면서, 지금까지 나온 CIECAM97s의 단점을 극복하면서 좀더 정확하고 향상된 기능을 할 것이다. 올해가 지나기 전에 그 모습을 나타낼 것이다.

5. CMCCAT2000과 CIEDE2000

컬러 어피어런스 모델의 중요한 요소 중의 하나는 색순응 변환이다. 영국 염색 학회(Society of Dyers

and Colourists: SDC)의 측색분과위원회(Colour Measurement Committee: CMC)에서 개발한 CMCCAT97가 CIECAM97s에서 사용하고 있었으나, 곧 나올 CIECAM02에서는 CMCCAT2000의 향상된 색순응 변화 모델을 사용할 것이다. 이에 간단히 CMCCAT2000에 대해서 소개한다[10].

가. CMCCAT2000

다음은 2000년에 제안된 색순응 변환(chromatic adaptation transform)에 대한 내용이다. 간단히 설명하면 다음과 같다[11].

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = M_B \begin{bmatrix} X/Y \\ Y/Y \\ Z/Y \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$M_B = \begin{bmatrix} 0.7982 & 0.3389 & -0.1371 \\ -0.5918 & 1.5512 & 0.0406 \\ 0.0008 & 0.0239 & 0.9753 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

$$M_B^{-1} = \begin{bmatrix} 1.076450 & -0.237662 & -0.161212 \\ 0.410964 & 0.554342 & 0.034694 \\ -0.010954 & -0.013389 & 1.024343 \end{bmatrix}$$

평균 환경에서는 F=1이고, dim, dark 환경에서는 F=0.8이며, D값이 0보다 작으면 0이고, 1보다 크면 1로 세팅한다.

$$D = F \left\{ \begin{array}{l} 0.08 \log_{10} [0.5(L_{A1} + L_{A2})] + 0.76 \\ -0.45(L_{A1} - L_{A2}) / (L_{A1} + L_{A2}) \end{array} \right\} \quad (31)$$

앞선 CIECAM97s의 색순응 변환에서는 청색 채널에서 지수를 이용한 비선형 변환이 이루어진 반면 CMCCAT2000에서는 청색 채널의 선형 변환이 가능하게 된 점이 가장 큰 차이점이다.

$$R_c = R[\alpha(R_{wr} / R_w) + 1 - D] \quad (32)$$

$$G_c = G[\alpha(G_{wr} / G_w) + 1 - D] \quad (33)$$

$$B_c = B[\alpha(B_{wr} / B_w) + 1 - D] \quad (34)$$

여기서 $\alpha = DY_w / Y_{wr}$

$$\begin{pmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{pmatrix} = M_B^{-1} \begin{pmatrix} R_c \\ G_c \\ B_c \end{pmatrix} \quad (35)$$

나. CIEDE2000

컬러 어피어런스 모델의 중요한 요소 중의 하나가 균등 컬러 스페이스 변환을 추구한다. 컬러 어피어런스의 색공간과는 달리 색오차값을 정확히 아는 색오차식을 구하는 것 또한 중요하다. 색오차식은 균등한 색공간의 요구에 따라 CIELAB의 기본 색오차식에서 계속 발전해 왔고 CMC, hunt에 의한 CIE94 등 많은 색오차식이 제기되어 왔다. 이번에는 CIE에서 표준적으로 제안된 색오차 공식 CIEDE 2000에 대해서 설명하겠다[12].

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16 \quad (37)$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \quad (38)$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (39)$$

$$C_{ab}^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}} \quad (40)$$

$$f(I) = \begin{cases} I^{1/3} & I \leq 0.008856 \\ 7.787I + 16.116 & I > 0.008856 \end{cases} \quad (41)$$

여기까지는 일반적인 CIELAB의 색오차식과 같다. 여기서 불완전한 색오차식을 보완한 것이다.

$$L' = L^* \quad (42)$$

$$a' = (1 + G)a^* \quad (43)$$

$$b' = b^* \quad (44)$$

$$C'^* = \sqrt{a'^2 + b'^2} \quad (45)$$

$$h' = \tan^{-1}(b' / a') \quad (46)$$

$$G = 0.5 \left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C_{ab}^{*7}}}{\overline{C_{ab}^{*7}} + 25^7}} \right) \quad (47)$$

여기서 $\overline{C_{ab}^{*7}}$ 는 샘플 쌍의 평균값을 의미한다.

$$\Delta L' = L'_b - L'_s \quad (48)$$

$$\Delta C' = C'_b - C'_s \quad (49)$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_b C'_s} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right) \quad (50)$$

$$\Delta h' = h'_b - h'_s \quad (51)$$

CIEDE2000의 색오차식은 다음과 같다.

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)} \quad (52)$$

여기서, $S_L = 1 + \frac{0.015(\overline{L'} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L'} - 50)^2}}$,

$$S_C = 1 + 0.045\overline{C'}, \quad S_H = 1 + 0.015\overline{C'}T \quad (53)$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\overline{h'} - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\overline{h'}) + 0.32 \cos(3\overline{h'} + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\overline{h'} - 63^\circ) \quad (54)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta)R_C, \quad \Delta\theta = 30 \exp\left\{-\left[\frac{(\overline{h'} - 275^\circ)}{25}\right]^2\right\}, \quad (55)$$

$$R_C = 2\sqrt{\frac{\overline{C'}^7}{\overline{C'}^7 + 25^7}}$$

III. 맺음말

지금까지 컬러 어피어런스를 모델과 정확한 색오차 값을 구하기 위한 CIEDE2000과 색 순응 변환의 최신 연구 동향에 대해서 설명하였다. 주변 환경에 따

른 컬러 어피어런스를 잘 모델링하는 것은 디스플레이 간 컬러의 재현 특성을 좋게 하며, 이는 측색광에 따른 조건 등색에 유용하게 사용될 수도 있고, 디스플레이 색 재현 장치에 사용하여 장치 독립적인 컬러 이미징 기술로 사용될 수 있다. 이로써, 컬러 디스플레이의 장치 개발과 더불어 장치 독립적인 컬러 재현 기술이 발달할 것은 당연한 이치다. 이에 가장 중요한 역할을 하는 컬러 어피어런스 모델의 개발은 필수 불가결한 요소일 것이다. 한국전자통신연구원에서는 이와 더불어 색역매핑, 디스플레이상에서 시간 공간상의 컬러 적용 및 현상 문제에 대한 지속적인 연구를 수행하고, 이런 모델을 기반으로 컬러 특성을 향상시키는 ASIC 개발에 참여하고 있으며, 앞으로 나올 컬러 어피어런스 모델에 대한 표준화에도 적극적으로 기여할 계획이다.

참고 문헌

- [1] M.D. Fairchild, Color Appearance Models. Reading: Addison-Wesley, 1998.
- [2] Nathan Moroney, Usage guidelines for CIECAM97s, CIE pub.
- [3] 여러 가지 color space model, Adobe, <http://www.adobe.com/support/techguides/color/colormodels/>
- [4] M.R. Luo and R.W.G. Hunt, The structures of the CIE 1997 colour appearance model(CIECAM97s), *Color Res. Appl.*, Vol. 23, 1998, pp. 138 - 146 .
- [5] CIE, The CIE 1997 interim colour appearance model(simple version), CIECAM97s. Vienna: CIE pub 131, 1998.
- [6] M.R. Luo and R.W.G. Hunt, Testing colour appearance models using corresponding colour and magnitude estimation data sets, *Color Res. Appl.*, Vol. 23, 1998, pp. 147 - 153.
- [7] C.J. Li, M.R. Luo, and R.W.G. Hunt, A revision of the CIECAM97s Model, *Color Res. Appl.*, Vol. 25, 2000, pp. 260 - 266.
- [8] M.D. Fairchild, A revision of CIECAM97s for practical applications, *Color Res. Appl.*, Vol. 26, 2001, pp. 418 - 427.
- [9] R.W.G. Hunt, C.J. Li and L.Y. Juan, M.R. Luo, Further Improvements to CIECAM97s, *Color Res. Appl.*,

- Vol. 27, 2002, pp. 164 - 170.
- [10] C.J. Li, M.R. Luo, B. Rigg, and R.W.G. Hunt, CMC 2000 Chromatic Adaptation Transform: CMCCAT 2000, *Color Res. Appl.*, Vol. 27, 2002, pp. 49 - 58.
- [11] M.R. Luo and R.W.G. Hunt, A Chromatic adaptation transform and a colour inconstancy index, *Color Res. Appl.*, Vol. 23, 1998, pp. 154 - 158.
- [12] M.R. Luo, G. Gui, and B. Rigg, The Development of the CIE2000 Colour-Difference Formula: CIEDE 2000, *Color Res. Appl.*, Vol. 26, 2001, pp. 340 - 350.