

# CIE 컬러 어피어런스 모델: CIECAM16

곽영신

(울산과학기술원 바이오메디컬공학과)

## 1. 서론

국제조명위원회 (CIE)는 빛과 조명의 측정에 관한 기술문서 및 국제 표준문서를 개발하는 국제기구로, 디스플레이 화질 연구를 위해서는 CIE에서 진행되는 표준 활동에 대한 파악이 반드시 요구된다.

CIE<sup>[1]</sup>는 다음과 같은 6개의 Division으로 구성되어 있는데, 이 중 Division1과 Division8이 디스플레이 화질과 가장 관련이 높다.

- Division 1: Vision and Colour
- Division 2: Physical Measurement of Light and Radiation
- Division 3: Interior Environment and Lighting Design
- Division 4: Transportation and Exterior Applications
- Division 6: Photobiology and Photochemistry
- Division 8: Image Technology

본 고에서는 2022년 Division1과 Division8 두 분과가 같이 참여한 Joint Technical Committee, JTC 10에서 출판한 “CIE 248:2022 The CIE 2016 Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM16”문서 내용에 대해 소개하고자 한다.

## 2. 컬러 어피어런스 모델

컬러 어피어런스 모델 (Color Appearance Model, CAM)은 영어 단어가 의미하는 것과 같이 색이 어떻게 눈에 보이는 가를 수학적으로 예측하는 모델로, 동일한 물리적 자극이라도 사람 눈에 보이는 색은 배경색, 주변 밝기 등과 같은 외부 환경에 따라 다르게 보이는 현상을 예측하기 위한 모델이다.

CIE에서 가장 처음으로 제안한 CAM은 CIECAM97s이고 2004년 CIECAM02로 개정된 후 2022년 CIECAM16<sup>[2]</sup>으로 새롭게 개정되었다. 2022년에 출판되었음에도 모델에 2016으로 표기하는 이유는 모델이 처음으로 소개된 논문<sup>[3]</sup>에서 사용한 모델명으로 지속적으로 표기하기 때문이다.

그림1은 CIE 컬러 어피어런스 모델의 구조를 나타낸 것이다. 먼저 입력값으로는 색값을 예측하고자 하는 컬러의 삼자극치값과 주변 환경에 대한 정보를 넣어준다. 이 값들을 이용해 가장 먼저 ‘Chromatic Adaptation’과정을 통해 레퍼런스 조건의 대응색 (corresponding color)로 변경 후 ‘Dynamic Adaptation’과정을 통해 원추세포의 신호로 변환한다. 원추세포 신호들은 Achromatic Signal, Red-Green, Yellow-Blue 세개의 반대색신호 (Opponent Signal)로 변환된 후 최종적으로 우리말로 색상, 명도, 채도에 대응하는 컬러 어피어런스 값

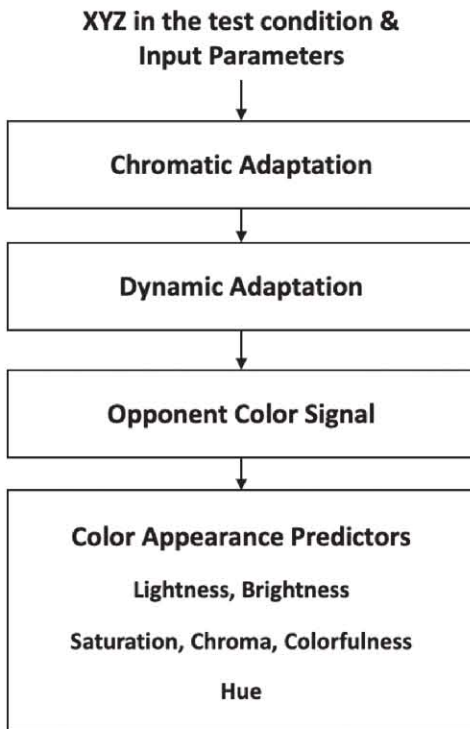


그림 1. CIE 컬러 어피어런스 모델 구조

색은 주변 환경에 따라 다르게 보이기 때문에 CIECAM16 사용을 위해서는 Visual Field에 대한 용어를 이해하여야 한다. 먼저 컬러 어피어런스를 알기 위한 색자극 (Stimulus)은 2도 시야각의 크기를 갖는 컬러를 의미하며, 색자극 바깥 영역 전체를 Adapting field라고 한다. Adapting field는 background와 surround로 구분하는데 Background는 색자극 바깥쪽으로 10도 크기의 영역을 의미하며, Surround는 Background 바깥쪽의 영역을 말한다.

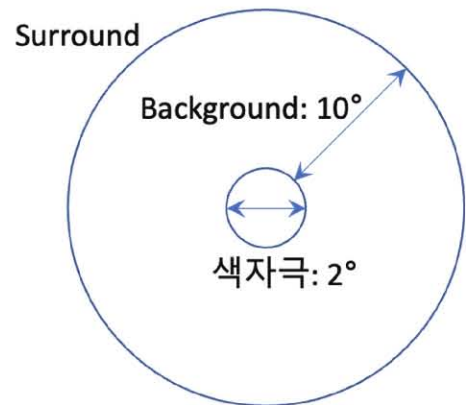


그림 2. Viewing Field

들로 계산된다.

CIECAM02 대비 CIECAM16에서 변경된 내용에 대해 다음 장에서 단계별로 알아보도록 하겠다.

### 3. CIECAM16

#### 3.1. 용어

CIECAM02와 마찬가지로 CIECAM16 또한 related color 즉 기준 백색을 포함한 여러 컬러들이 동시에 제시된 환경에서 적용 가능한 모델이다. 시야 안에 단 하나의 색 자극만이 제시되는 unrelated color조건에서는 적용할 수 없는 모델이라는 의미이다. 또한 평균 휘도가 5 cd/m<sup>2</sup> 이상이라 원추세포들만 작동하는 photopic vision 조건에서 적용 가능하다. 평균 휘도가 그 이상 낮아지면 막대세포도 같이 반응을 하게 되는데 원추세포 및 막대세포 둘 다 작동하는 mesopic vision, 막대 세포만 작동하는 아주 어두운 환경이 scotopic vision에 대해서는 CIE TC1-96에서 다루고 있다.

앞에서 설명한바와 같이 기존 모델들과 마찬가지로 CIECAM16도 CIE 1931 표준관찰자 (2도 관찰자) 함수를 사용한 삼자극치 값을 입력 값으로 사용하도록 되어 있으나 많은 기존 연구에서는 편의상 CIE 1964 XYZ를 이용하기도 한다. 하지만 현재 CIE 모델들은 2도 데이터만을 기반으로 개발되었기에 10도 색자극에 대한 연구 결과는 없는 상황이다.

#### 3.2. 입력 및 출력값

테스트 환경에서 CIE 1931 삼자극치가 X, Y, Z인 색자극의 어피어런스 값을 알기 위해 CIECAM16 모델을 이용하려면 입력값으로 다음의 값들에 대한 측정이 필요하다.

- 테스트 환경에서 흰색의 CIE 1931 삼자극치값:  $X_w, Y_w, Z_w$
- 테스트 환경에서 Background의 Y값:  $Y_b$
- Adapting field의 휘도 (cd/m<sup>2</sup>):  $L_A$

- 레퍼런스 화이트 (CIE illuminance E)의 CIE 1931 XYZ:  $X_w = Y_w = Z_w = 100$  (모델에서 상수로 취급)
- Surround Parameter:  $c, N_c, F$

여기에서 삼자극치는 상대 삼자극치로  $Y_w$ 가 100으로 정규화 된 삼자극치 값을 사용해야 하며 Adaptation Luminance  $L_A$ 값을 이용해 색인지에 영향을 미치는 주변환경의 휘도 정보를 주게 되어있다. 일반적으로  $L_A$ 값으로 기준 백색 휘도의 20 % 값을 사용한다. 하지만  $L_A$ 값을 어떻게 측정할 것인가에 대해서는 아직 명확히 알려진 바가 없으며, 현재도 많은 관련된 연구가 진행되고 있다.

Surround Parameter  $c, N_c, F$ 는 surround 조건에 따라 결정되는 파라미터 값으로, Surround는 Average, Dim, Dark라는 세 개의 카테고리로 구분한다. 외광에 의해 반사된 컬러들을 보는 환경은 average 조건에 해당하며, 디스플레이 영상 시청 환경처럼 외광의 밝기와 컬러를 제시하는 영상의 밝기가 독립적인 경우 Surround ratio,  $S_R$ 값에 따라 테스트 환경이 어떤 카테고리에 해당하는 가를 결정한다. Surround ratio는 Surround의 평균 화이트 휘도를 디바이스의 화이트 휘도로 나눈 값이다. 암실에서 디스플레이를 보는 경우  $S_R$ 이 0이 되고 이는 Dark surround에 해당한다.  $S_R$ 이 0 보다는 크고 0.2보다 작은 경우는 Dim surround, 0.2와 같거나 큰 경우는 Average surround로 세팅 값을 정한다.

입력 파라미터 세팅 시 주의해야할 점 하나는  $Y_b$  값은 0보다 반드시 커야 한다는 것이다. 0으로 세팅 하게 되면 계산 오류가 발생한다.

CIECAM02 모델의 결과값으로는 다음과 같이 7개의 인지 값이 계산된다. 색 인지 모델의 삼차원의 축인 밝기 (achromatic attribute), 채도 (chromatic attribute), 색상 (hue) 각각에 대해 상대적인 크기인지, 절대적인 크기 인지 등에 따라 용어가 다르게 사용된다.

- Achromatic Predictors: Lightness J, Brightness Q
- Chromatic Predictors: Chroma C, Colorfulness M, Saturation s

- Hue predictors: Hue quadrature H, Hue angle h

각각의 어피어런스 용어에 대한 설명은 CIE International Lighting Vocabulary 문서<sup>[4]</sup>에 정의되어 있으며, e-ILV 사이트<sup>[5]</sup>를 통해서도 검색이 가능하다.

### 3.3. 색 및 밝기 순응 (Chromatic / Dynamic Adaptation)

그림1에 도식된 바와 같이 입력값들은 가장 먼저 색 및 밝기 순응 과정을 거치는데, 이 단계에서 기존 CIECAM02 대비 CIECAM16에서는 XYZ 신호를 RGB 신호로 변경하는 과정과 RGB 신호를 하이퍼볼릭 함수를 이용해 post-adaptation cone신호로 변환하는 과정이 바뀌었다.

국제 표준에 따라 현재 모든 컬러 측정은 CIE 1931 삼자극치 값 XYZ로 표기되어야 하나 실제 사람 눈에서 색인지는 원추세포 신호, LMS에서 출발한다. 따라서 CIECAM16에서도 기존 모델들과 마찬가지로 입력된 XYZ값들을 원추세포 신호와 유사한 신호로 변환하는 과정이 필요하다. 아직 CIE에서는 표준으로 정의된 원추세포 함수가 없기때문에 문서에서는 ‘원추세포 같은’ (cone-like)이라는 표현을 사용하고 RGB 라는 기호를 사용한다.

입력된 색 신호들은 가장 먼저 화이트에 대한 색 및 밝기에 대해 순응 (adaptation)된 원추세포 신호로 변환되는데, 원추세포 신호는 XYZ값들에 3x3 행렬을 적용해 얻는다. 기존 CIECAM02에서는 색순응을 위한 변환 행렬과 신호와 밝기 순응을 위해 행렬이 서로 다르게 적용되었다. 색순응을 위해서는 CAT02로 불리는 행렬을, 밝기 순응을 위해서는 HPE 행렬을 사용한다. 이는 인지 실험 데이터를 최적화하는 과정에서 피치 못하게 발생한 문제였으나, 이번 CIECAM16 모델에서는  $M_{16}$ 이라는 하나의 행렬을 사용한다.

입력된 테스트 컬러의 XYZ값을  $M_{16}$  행렬을 이용해 RGB 신호로 변환 후 테스트 및 레퍼런스 환경의 화이트 값 및 Degree of Adaptation, D 함수를 이용해 레퍼런스 조명 (CIE illuminance E) 하에서의 corresponding RGB값인  $R_c, G_c, B_c$ 값으로 변

환한다. Corresponding color란 서로 다른 두 조명에서 동일한 색으로 인지되는 색의 쌍을 의미하는 것으로 테스트 조명에서 RGB와 레퍼런스 조건에서 RcGcBc가 숫자는 다르지만 눈으로 보서는 동일한 색을 나타낸다는 것을 의미한다.

아래 수식 (1)은 RGB에서 RcGcBc를 계산하는 과정으로 수식은 CIECAM02와 동일하며, 여기에서  $D$ 는 색순응 정도를 나타내는 값으로 1은 완전히 순응된 경우를 0은 전혀 순응되지 않은 상태를 의미한다. 테스트 시정 환경의 밝기 정보인  $L_A$ 값이 커질수록 즉 밝은 환경일수록  $D$ 값이 1에 가까워진다.

$$\begin{pmatrix} Rc \\ Gc \\ Bc \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} D_R \cdot R \\ D_G \cdot G \\ D_B \cdot B \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$D_i = D \frac{100}{i_w} + 1 - D \text{ where } i = R, G \text{ or } B$$

색 순응이 반영된 RcGcBc 신호는 밝기에 따른 순응을 고려한 post-adaptation cone responses,  $R_a$ ,  $G_a$ ,  $B_a$ 값으로 변환된다. 수식(2)는 R 신호에 대한 함수로 G, B 신호도 동일한 방식으로 계산된다.

$$R_a = f_e(Rc) + 0.1 \quad (2)$$

$$\text{where } f_e(Rc) = \begin{cases} f(q_U) + f'(q_U)(Rc - q_U) & \text{if } Rc > q_U \\ f(Rc) & \text{if } q_L \leq Rc \leq q_U \\ f(q_L)Rc/q_L & \text{if } Rc < q_L \end{cases}$$

수식(2)에서 함수  $f(Rc)$ 는 CIECAM02에서 밝기 순응에 사용된 함수이며,  $f'(Rc)$ 는  $f(Rc)$ 의 1차 미분 함수를 의미한다. 기존 CIECAM02 대비 CIECAM16에서는 Rc가  $q_L=0.25$ 보다 작거나  $q_U=150$ 보다 큰 양쪽 끝단에서 수식 오류를 최소화하도록 보완되었다.

### 3.4. Opponent Signal 및 컬러 어피어런스 계산

$R_a$ ,  $G_a$ ,  $B_a$ 값은 redness-greenness 성분을 나타내는 a, yellowness-blueness 성분을 나타내는 b, achromatic 성분을 나타내는 A값으로 바뀐 후 3.1절에서 소개한 7개의 컬러 어피어런스 값으로 변환되는데, 이 단계는 기존 CIECAM02와 동일하다.

CIE 컬러 어피어런스 모델은 입력 파라미터로 제시된 background 및 surround 조건에 따른 어피어런스 변화 정도를 예측한다. 예를 들어 Lightness  $J$ 의 경우 background  $Y_b$ 값이 커질수록, surround ratio,  $S_R$ 이 증가하면  $J$ 값이 낮아진다. 그림 3은  $Y_b$  값 변화에 따른 자극의 밝기 변화를 나타내는 명도대비 현상을 보이는 예시이다.

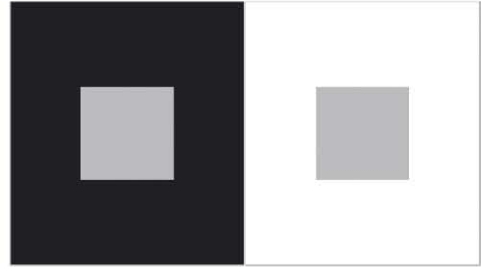


그림 3. 명도 대비 현상

## 4. CIECAM16의 한계 및 향후 발전 방향

컬러 어피어런스 모델은 사람 눈에 보이는대로 색을 표현하는 색인지 모델로 CIE에서 제시하는 모델은 디스플레이 화질 연구에 폭넓게 사용되고 있다.

2022년 제안된 CIECAM16 모델과 기존 CIECAM02과의 가장 큰 차이는 XYZ값을 RGB 신호로 변환하는 과정과 하이퍼볼릭 함수로 RGB 신호를 압축하는 과정 두 단계이다. 기존 CIECAM02의 수치 오류를 해결하기는 하였으나, 어피어런스 현상 자체의 예측값이 크게 달라지지는 않는다. 그렇다 보니 디스플레이 시정 환경에 적용 시 기존 모델의 한계를 그대로 가지고 있다.

먼저 Adaptation Luminance  $L_A$ 의 세팅 방법이다. 앞에서 소개한바와 같이 현재  $L_A$ 를 측정하는 명확한 방법은 알려져 있지 않다. 시야에 들어오는 모든 빛 신호의 평균이 20% 회색이 된다는 가정을 기반으로 디스플레이 화이트 휘도의 20%를 적용하도록 제안하고는 있으나, 다양한 디스플레이 크기 및 외광 휘도 조건에 적용하기에는 아직 충분치 않다. 색순응 함수 또한 외광의 세기만 고려하지 색도는 고려하지 않는다는 점도 한계로 작용하고 있다.

CIECAM16 이후로도 컬러 어피어런스 관련 다양

한 연구가 계속되고 있으므로 향후 더 좋은 성능의 표준이 개발될 수 있을 것으로 기대한다.

마지막으로 CIE 문서 구매에 관한 정보를 공유하고자 한다. CIE 문서는 CIE 온라인 스토어를 통해 구매할 수 있는데, 문서 구매 시 멤버십 코드를 넣으면 할인 혜택을 받을 수 있다. 멤버십 코드는 CIE 회원국에게 제공되는 코드로 한국 또한 회원국 중 하나이다. 한국 CIE (KCIE)는 별도로 회원 가입이 필요하지는 않기 때문에 한국 사람이면 누구나 멤버 할인을 받을 수 있다. 현재 KCIE는 별도의 사무국 없이 한국 조명·전기설비학회 (KIIEE)에서 업무를 같이 맡아주고 있으므로, KIIEE 사무국에 연락해 멤버십 코드를 요청해 받으면 된다.

### 참고문헌

- [1] <https://cie.co.at/>
- [2] CIE 248:2022 The CIE 2016 Colour Appearance Model for Colour Management Systems: CIECAM16
- [3] C. Li, Z. Li, Z. Wang, Y. Xu, M. R.Luo, G. Cui, M. Melgosa, M.H. Brill, M. Pointer, Color Research & Application, **42**(6), 703-718 (2017).
- [4] CIE S 017:2020 ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd edition.
- [5] <https://cie.co.at/e-ilv>

### 저자약력

#### 곽영신



- 2003년 8월 ~ 2009년 2월 : 삼성종합기술원 전문연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 울산과학기술원 교수
- 2015년 7월 ~ 현재 : CIE Division1 (Vision and Colour) Director
- 2016년 1월 ~ 2019년 12월 : KIDS 화질연구회 회장

- 2021년 1월 ~ 2022년 12월 : KIDS 영남지부 지부장
- 관심분야 : 색채과학, 컬러 어피어런스 모델, 디스플레이 화질