

제 3 장

표색계 (Colorimetry)

3.1 표색계의 기초

3.1.1 색의 정의

통상 우리들이 무의식적으로 “색”이란 말을 사용하고 있으나, 엄밀히는 ‘색 감각에 의한 색’과 ‘색 지각에 의한 색’으로 구별된다.

색 감각에 의한 색은 심리물리색으로도 불리며, 심리량으로서의 색과 이를 감지토록 하는 물리량으로서 광의 분광 특성과의 관계를 측정하는 심리물리실험에 의한 심리 물리량으로써 정량적으로 규정되는 것이다.

한편, 색지각에 의한 색은 지각색으로도 불리며, 심리량으로서 인간이 지각한 색을 기호, 색표 등을 사용하여 정성적으로 규정하는 것이다.

3.1.2 混色系와 顯色系

일반적으로 색을 표시하는 체계를 표색계라 한다. 표색계에는 심리물리색을 표시하는 혼색계와, 지각색을 표시하는 현색계가 있다.

혼색계의 대표적인 것은 색을 3 자극치로써 정량적으로 취급하는 CIE 표색계가 있고, 현색계의 대표적인 것으로는 색을 색상, 명도, 채도로써 정성적으로 취급하는 Munsell 표색계와 Ostwald 표색계가 있다.

일반적으로 색을 정량적, 수학적으로 취급하는 데는 혼색계가 편리하고, 표시한 색이 감각적으로 어떻게 보일 것인가는 현색계 쪽이 평가하기 쉽다.

3.1.3 Basic colorimetric concepts ^[1]

3.1.3.1 색의 3 색성 (Trichromatic generalization)

거의 모든 특정 색은 기본이 되는 세 개의 서로 다른 색을 적당한 비율로 가법 혼색 (additive mixture)시키면 등색 (color matching)을 이룬다. 이를 색의 3 색성(Trichromatic generalization)이라 한다. 이는 Young-Helmholtz의 3 원색설로 알려져 있는 경험적 법칙이다.[2]

기본이 되는 세 개의 색, 즉 3 원색의 선택 방법은 매우 많으나 완전히 임의적으로 결정될 수는 없다. 세 개의 색 중에서 두 색을 가법 혼색할 때 나머지 한 색이 되지 않는 조합의 세가지 색을 3 원색(Trichromacy)이라 한다.

가법 혼색의 모든 스펙트럼 영역의 어떤 파장 대역에서의 power는 혼색 각 성분들의 동일한 파장 대역내에서의 power를 합한 것과 같음을 뜻한다. 가법 혼색에는 다음의 네 가지의 법칙이 성립한다.

(i) Symmetry Law

색자극 **A**가 색자극 **B**와 등색(match)을 이루면, 색자극 **B**가 색자극 **A**와 등색이다. 여기서 등색을 \equiv 로 표시하면 다음과 같다.

$$\mathbf{A} \equiv \mathbf{B} \text{ 이면 } \mathbf{B} \equiv \mathbf{A} \text{ 이다.}$$

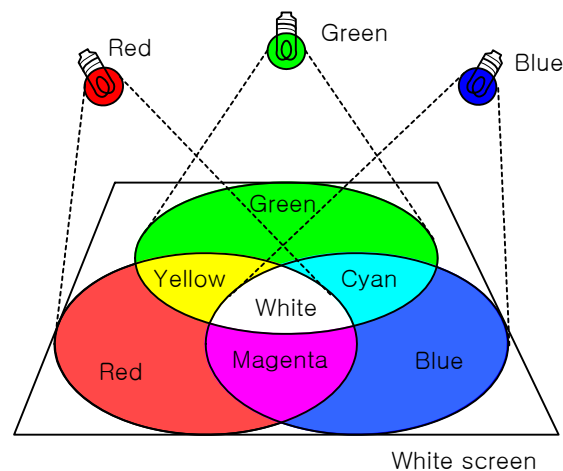


그림 3.1 Additive mixtures.

(ii) Transitivity Law

A가 **B**와 등색이고, **B**가 **C**와 등색이면 **A**는 **C**와 등색이다. 즉,

$A \equiv B$, 그리고 $B \equiv C$ 이면 $A \equiv C$ 이다.

(iii) Proportionality Law

색자극 **A**가 색자극 **B**와 등색(match)을 이루면, αA 는 αB 와 등색이다. 즉,

$A \equiv B$ 이면 $\alpha A \equiv \alpha B$ 이다.

여기서 α 는 스펙트럼 분포를 바꾸지 않고 색자극의 방사 파워를 증감시키는 정의 계수이다.

(iv) Additivity Law

A, **B**, **C**, **D**가 4개의 색자극이면 다음이 성립한다. 여기서 +는 가법 혼색을 나타낸다.

$A \equiv B, C \equiv D$ 이면 $A + C \equiv B + D, A + D \equiv B + C$

상기 원리에 의한 3색성의 등색 법칙을 Grassman's law라 한다. 등색 실험에는 일반적으로 다음의 3가지 factor를 고려하여야 한다.

(a) Observational conditions

두 색자극은 동일한 형태로 동일한 영역에 인접하여 제시되어야 한다.

(b) Previous exposure of the eye to light

등색 실험 직전, 눈에 노출된 광은 persistence of color matches(등색 지속성)로 알려진 trichromatic generalization의 확장으로 취급된다. 이에 따르면 등색 실험 전에 노출된 백색광이나 색광, 또는 변화하는 광이 등색 조건에 영향을 미치지 않는 것으로 추산된다. 그러나 이 때에도 등색을 이루는 두 색자극이 색지각에 영향을 주지않는 것은 아니다.

이 등색의 지속성은 적절히 밝은 광에의 노출에 대한 것이고 지나치게 밝은 광에의 사전 노출에서는 등색 조건이 무너진다. 특히 등색 시야의 크기가 망막상에서 rod-free 영역보다 크면 분광 분포가 다른 색자극에 대해서 등색 조건이 달라진다.

(c) Different observers

임의의 색과 등색을 이루는데 모두가 독립적인 3 원색의 가법 혼색을 필요로 하지는 않는다. 남자의 2.6%, 여자의 0.05%는 2 원색이면 충분한데 이들은 색각 이상으로 분류되는 소위 dichromats(2 색성 색각 소유자)이다. 또한 사람의 0.003%는 색을 전혀 느끼지 못하는 색맹(monochromats)으로써, 밝기만을 구분한다.

등색을 이루는데 3 원색을 요하는 사람 중에서도 남자의 5.5%, 여자의 0.4%는 비정상적 3 색각(anomalous trichromats)을 지니고 있다.

상기의 monochromats, dichromats, anomalous trichromats 등 색각 이상자를 제외하면 인간의 약 95%가 정상적인 색각을 지니고 있다. 이들 정상적인 색각을 지닌 사람들의 color matching 특성이 ideal 또는 average normal observe 의 color matching 특성에 근접한 것으로 생각될 수 있다.

3.1.3.2 Tristimulus Space

어떤 특정 색자극(specific color stimulus) \mathbf{Q} 의 스펙트럼 분포를 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{Q} = \{P_\lambda d\lambda\}_Q \quad (3.1)$$

마찬 가지로 단위 3 원자극(primary tristimulus) $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ 는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{R} &= \{\rho P_\lambda d\lambda\}_R \\ \mathbf{G} &= \{\gamma P_\lambda d\lambda\}_G \\ \mathbf{B} &= \{\beta P_\lambda d\lambda\}_B \end{aligned} \quad (3.2)$$

여기서 $\rho, \gamma, \beta = \text{positive constant}$ 이다.

상기 식으로부터 특정 색자극 \mathbf{Q} 는 3 원자극 $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ 의 적절한 가법혼색에 의한 등색을 다음과 같이 벡터 방정식으로 표시할 수 있다.

$$\mathbf{Q} = R_Q \mathbf{R} + G_Q \mathbf{G} + B_Q \mathbf{B} \quad (3.3)$$

여기서 R_Q, G_Q 및 B_Q 를 원자극(primary stimulus) $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ 의 단위로 측정된 색자극 \mathbf{Q} 의 3 자극치(tristimulus values)라 한다.

3.1.3.3 색도 좌표(chromaticity coordinates)

벡터 방정식 (3.3)에서와 같이 임의의 색을 3 원색의 자극치로 나타낼 수 있기 때문에 3 원색을 3 축으로 하는 선형 3 차원 좌표계로 색을 표현할 수 있다.

그림 3.2 의 RGB 직각 좌표계에서, 벡터 $\mathbf{Q} (= R_Q \mathbf{R} + G_Q \mathbf{G} + B_Q \mathbf{B})$ 와 $r + g + b = 1$ 인 평면이 만나는 좌표를 $p(r, g)$ 라 하고, \mathbf{Q} 점을 포함하면서 $r + g + b = 1$ 인 평면과 평행한 평면의 방정식은 $r + g + b = k$ 가 되므로 다음의 관계가 성립한다.

$$\frac{R_Q}{r} = \frac{G_Q}{g} = \frac{B_Q}{b} = k \quad (3.4a)$$

$$\frac{R_Q + G_Q + B_Q}{r + g + b} = k \quad (3.4b)$$

상기 두 식과 $r + g + b = 1$ 인 관계로부터

$$r = \frac{R_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (3.5a)$$

$$g = \frac{G_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (3.5b)$$

$$b = \frac{B_Q}{R_Q + G_Q + B_Q} \quad (3.5c)$$

따라서 좌표 (r, g) 만으로 색 \mathbf{Q} 를 나타낼 수 있다.

3.1.3.4 Conversion between two systems of primaries

색 \mathbf{C} 는 그림 3.2 에 보인 것과 같이 3 차원 선형 벡터 공간을 이루므로 3 원자극(기본 벡터)이 상호 독립이면 자유로이 선택할 수 있다.

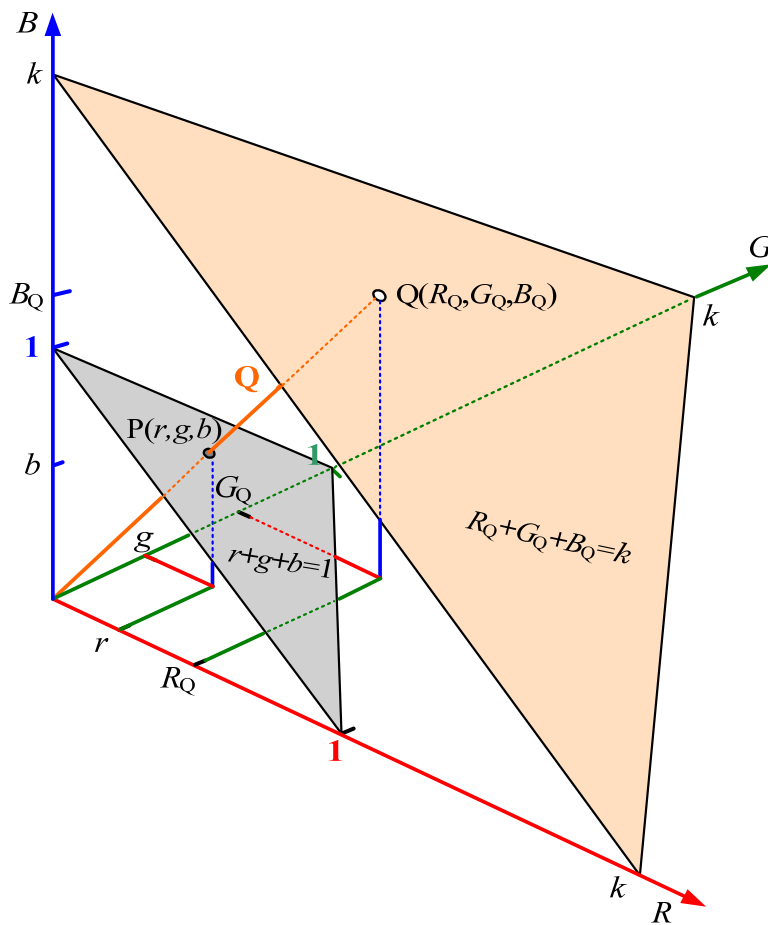


그림 3.2 RGB-tristimulus and (r, g, b) -chromaticity diagram.

하나의 3 원자극 $\mathbf{R}', \mathbf{G}', \mathbf{B}'$ 는 다른 3 원자극 $\mathbf{R}, \mathbf{G}, \mathbf{B}$ 의 혼색에 의해 등색이 되므로 이들 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{aligned}\mathbf{R}' &= a_{11}\mathbf{R} + a_{21}\mathbf{G} + a_{31}\mathbf{B} \\ \mathbf{G}' &= a_{12}\mathbf{R} + a_{22}\mathbf{G} + a_{32}\mathbf{B} \\ \mathbf{B}' &= a_{13}\mathbf{R} + a_{23}\mathbf{G} + a_{33}\mathbf{B}\end{aligned}\quad (3.6)$$

여기서 계수 a_{ij} 는 3 원자극 $\mathbf{R}', \mathbf{G}', \mathbf{B}'$ 의 3 자극치이다. 이를 매트릭스 형식으로 표현하면

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}' \\ \mathbf{G}' \\ \mathbf{B}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{21} & a_{31} \\ a_{12} & a_{22} & a_{32} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{G} \\ \mathbf{B} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

역변환이 존재하기 위해서는 변환 계수 행렬 A 의 행렬식의 값 $|A|$ 가 영이 아닐 것이 필요 충분 조건이다. $\mathbf{R}'\mathbf{G}'\mathbf{B}'$ 시스템에서 임의의 색 \mathbf{C} 의 등색식은

$$\mathbf{C} = R'\mathbf{R}' + G'\mathbf{G}' + B'\mathbf{B}' \quad (3.8)$$

이다. 식(8)에 식(6)을 대입하면

$$\mathbf{C} = R'(a_{11}\mathbf{R} + a_{21}\mathbf{G} + a_{31}\mathbf{B}) + G'(a_{12}\mathbf{R} + a_{22}\mathbf{G} + a_{32}\mathbf{B}) + B'(a_{13}\mathbf{R} + a_{23}\mathbf{G} + a_{33}\mathbf{B}) \quad (3.9)$$

우변을 정리하면

$$\mathbf{C} = (a_{11}R' + a_{12}G' + a_{13}B')\mathbf{R} + (a_{21}R' + a_{22}G' + a_{23}B')\mathbf{G} + (a_{31}R' + a_{32}G' + a_{33}B')\mathbf{B} \quad (3.10)$$

한편, \mathbf{RGB} 시스템에서 임의의 색 \mathbf{C} 의 등색식은

$$\mathbf{C} = R\mathbf{R} + G\mathbf{G} + B\mathbf{B} \quad (3.11)$$

이므로 \mathbf{RGB} 시스템에서의 3 자극치 R, G, B 는 식(10)과 (11)로부터

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} R' \\ G' \\ B' \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

3.2 CIE 표색계^[1]

CIE 표색계는 국제 조명 위원회 (CIE: Commission Internationale de l' Eclairage)가 1931 년의 회의에서 기준으로 만든 것으로, 혼색계를 대표하는 표색계이다. CIE 표색계에는 RGB 표색계와 XYZ 표색계가 있다. RGB 표색계는 CIE 표색계의 기본이 되며, XYZ 표색계는 수학적 취급이 용이하기 때문에 편의적으로 RGB 표색계를 수학적 변환으로 도출된 것이다.

3.2.1 CIE 1931 color matching function

단색광의 RGB 3원색으로써 동일 파워의 단색광에 등색시키기 위한 방정식은 다음과 같이 주어진다

$$\mathbf{E}(\lambda) = \bar{r}(\lambda)\mathbf{R} + \bar{g}(\lambda)\mathbf{G} + \bar{b}(\lambda)\mathbf{B} \quad (3.13)$$

여기서

$E(\lambda)$: Monochromatic stimuli of unit radiant power

$\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$: Color matching function.

CIE에서는 **RGB** 3원색으로써 700 nm, 546.1 nm, 435.8 nm의 단색광으로 동일 파워의 단색광에 등색시키기 위해서 그림 3.3에서와 같이 2° 시야에 대한 등색 실험을 하였다. 상기 실험을 바탕으로 식(3.13)의 color matching function을 그림 3.4에서와 같이 최종적으로 결정하였다.

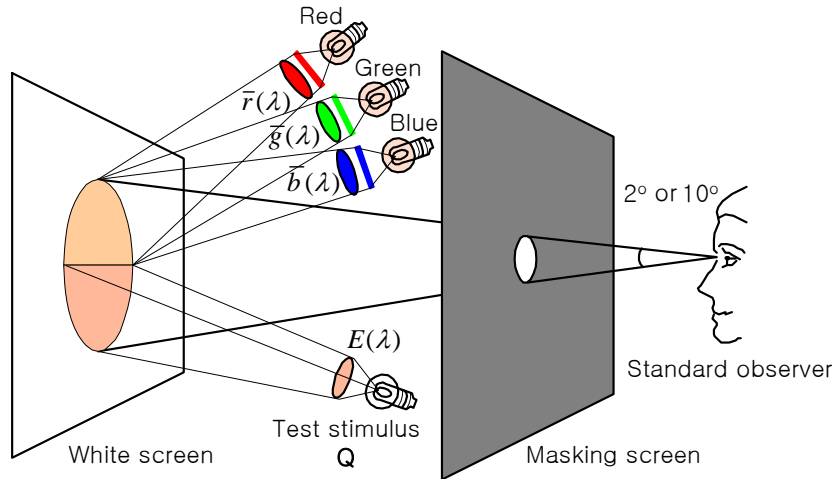


그림 3.3 칼라 매칭 실험 모식도

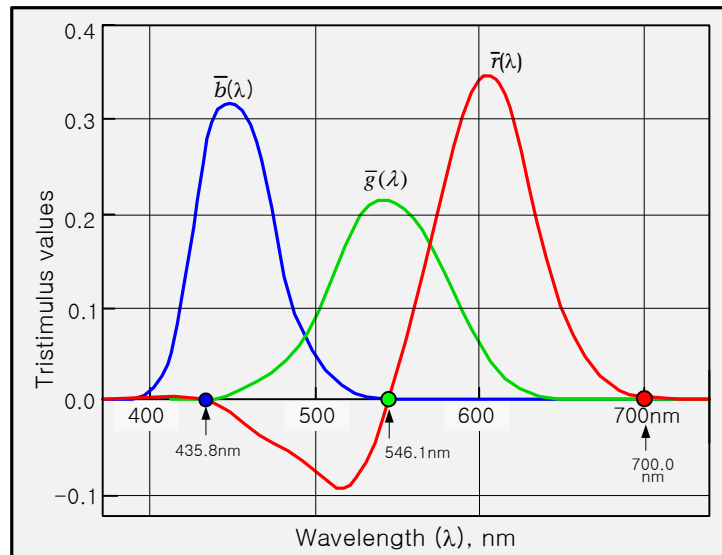


그림 3.4 Spectral tristimulus values $\bar{r}(\lambda), \bar{g}(\lambda), \bar{b}(\lambda)$ of monochromatic stimuli $E(\lambda)$ of unit radiant power, with respect to the three fixed primary stimuli **R,G,B**, also monochromatic stimuli and of wavelengths $\lambda_R=700\text{nm}$, $\lambda_G=546.1\text{nm}$, $\lambda_B=435.8\text{nm}$. The units of the primary stimuli are of radiant power ratios $P_R:P_G:P_B=72.1:1.4:1.0$.

그림 3.4에서 $\bar{r}(\lambda)$ 는 435 nm에서 546 nm 사이에서 negative의 값을 갖는다. 이 범위에 있는 단일 파장의 색은 단순히 **RGB**를 가색하여 등색이 되는 조건이 성립하지 않는다. 이 경우에는 475 nm의 색에 적당한 **R**을 가색한 색과 등색이 되는 조건을 실험적으로 구하여 나타낸 것이다. 예를 들면 $\mathbf{E}_{475} + 0.045\mathbf{R} = 0.032\mathbf{G} + 0.186\mathbf{B}$ 인 경우 $\mathbf{E}_{475} = -0.045\mathbf{R} + 0.032\mathbf{G} + 0.186\mathbf{B}$ 로 표현한 것이다.

칼라 matching function $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 로부터 단일 스펙트럼의 색을 *rgb* 좌표로 나타내기 위해서는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} r &= \frac{\bar{r}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ g &= \frac{\bar{g}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \\ b &= \frac{\bar{b}(\lambda)}{\bar{r}(\lambda) + \bar{g}(\lambda) + \bar{b}(\lambda)} \end{aligned} \quad (3.14)$$

상기식을 사용하여 가시광 영역의 단일 스펙트럼광을 (*r, g*)-색도도(Chromaticity diagram)에 나타내면 다음 그림 3.5에서와 같다.

3.2.2 복합 색자극(Complex color stimulus)

복합적인 스펙트럼으로 구성된 복합 색자극 $Q(\lambda)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

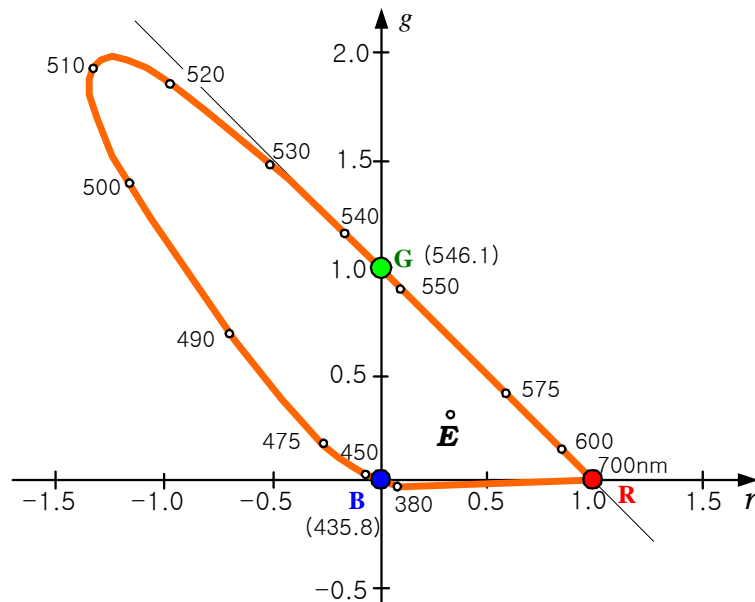


그림 3.5 Chromaticity diagram of CIE 1931 standard colorimetric observer in the system of real primary stimuli **R, G, B**.

$$\begin{aligned}
Q(\lambda) &= \{P_\lambda d\lambda\} E(\lambda) \\
&= \{P_\lambda d\lambda\} \{\bar{r}(\lambda) \mathbf{R} + \bar{g}(\lambda) \mathbf{G} + \bar{b}(\lambda) \mathbf{B}\} \\
&= \{P_\lambda d\lambda\} \bar{r}(\lambda) \mathbf{R} + \{P_\lambda d\lambda\} \bar{g}(\lambda) \mathbf{G} + \{P_\lambda d\lambda\} \bar{b}(\lambda) \mathbf{B}
\end{aligned} \tag{3.15}$$

따라서 Q 와 등색을 이루는 total 3 자극치 R, G, B 는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
R &= \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{r}(\lambda) d\lambda, \\
G &= \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{g}(\lambda) d\lambda, \\
B &= \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} P(\lambda) \bar{b}(\lambda) d\lambda.
\end{aligned} \tag{3.16}$$

Q 의 색도 좌표 r, g, b 는 마찬가지로

$$r = \frac{R}{R+G+B}, \quad g = \frac{G}{R+G+B}, \quad b = \frac{B}{R+G+B}. \tag{3.17}$$

한편, 색도 좌표가 동일할 때라도 다음과 같이 두 가지의 경우가 있다.

- (1) Metameric match (조건 등색) : 분광 분포는 다르나 동일색으로 보이는 경우.
- (2) Isometric match (동질 등색) : 분광분포가 동일하여 완전한 등색인 경우.

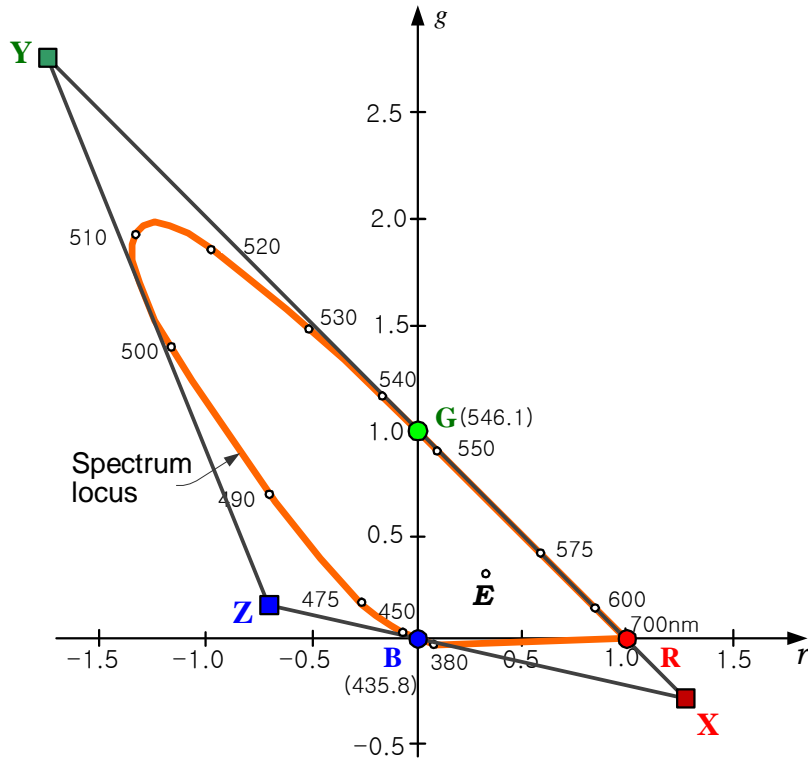


그림 3.6 The locations of the CIE 1931 primary stimuli \mathbf{X} , \mathbf{Y} , and \mathbf{Z} in the RGB chromaticity diagram.

3.2.3 XYZ 시스템

rgb 색도 좌표의 단점은 negative 영역이 존재하여 색도 좌표 계산이 불편한 단점이 있다. *rgb* 색도 좌표의 단점을 보완하기 위해서, CIE는 **RGB** 대신에 그림 3.6에서와 같이 *rgb* 좌표계에서 가시광 영역을 내부에 포함하는 새로운 가상적인 tristimulus **XYZ**에 대한 color matching function $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 가 다음의 조건을 만족하도록 $\bar{r}(\lambda)$, $\bar{g}(\lambda)$, $\bar{b}(\lambda)$ 를 수학적으로 변환하였다.

- (1) negative 영역이 없을 것.
- (2) $\bar{y}(\lambda)$ 는 눈의 비시감도(분광시감 효율) $V(\lambda)$ 와 일치할 것.

결국 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 는 최종적으로 다음과 같은 수학적 변환으로 결정했다.

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2.7689 & 1.7528 & 1.1302 \\ 1.0000 & 4.5907 & 0.0601 \\ 0.0000 & 0.0565 & 5.5943 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

상기 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$ 를 그래프로 나타내면 다음 그림 2.7과 같다. 따라서 가상적인 3원자극 **XYZ**를 이용한 단일 스펙트럼 equal energy 광의 등색 조건은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E(\lambda) = \bar{x}(\lambda) \mathbf{X} + \bar{y}(\lambda) \mathbf{Y} + \bar{z}(\lambda) \mathbf{Z} \quad (3.19)$$

한편, 단일 스펙트럼광의 색을 *xy*좌표로 나타내기 위해서는 다음과 같이 된다.

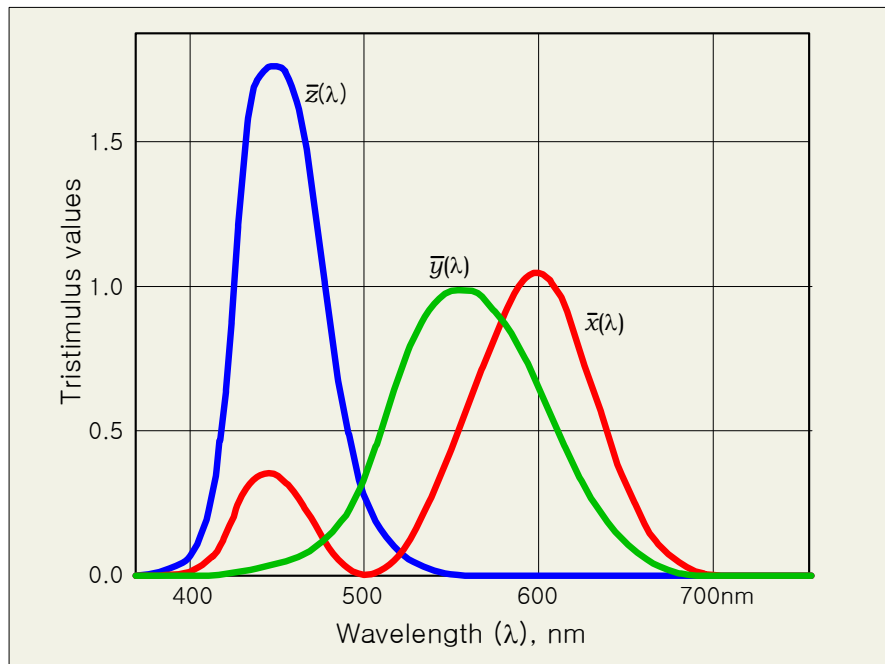


그림 3.7 Color-matching function of CIE 1931 standard colorimetric observer in the transformed system of imaginary primary stimuli **X, Y, Z**.

$$\begin{aligned}
x &= \frac{\bar{x}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \\
y &= \frac{\bar{y}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)} \\
z &= \frac{\bar{z}(\lambda)}{\bar{x}(\lambda) + \bar{y}(\lambda) + \bar{z}(\lambda)}
\end{aligned} \tag{3.20}$$

또한 복합 색자극 (Complex color stimulus) $F(\lambda)$ 의 경우

$$\begin{aligned}
F(\lambda) &= \{\phi(\lambda)d\lambda\}E(\lambda) \\
&= \{\phi(\lambda)d\lambda\} \{ \bar{x}(\lambda) \mathbf{X} + \bar{y}(\lambda) \mathbf{Y} + \bar{z}(\lambda) \mathbf{Z} \} \\
&= \phi(\lambda)d\lambda \bar{x}(\lambda) \mathbf{X} + \phi(\lambda)d\lambda \bar{y}(\lambda) \mathbf{Y} + \phi(\lambda)d\lambda \bar{z}(\lambda) \mathbf{Z}
\end{aligned} \tag{3.21}$$

따라서 F와 등색을 이루는 total 3 자극치 X, Y, Z는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
X &= k \int_{\lambda_b}^{\lambda_a} \phi(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
Y &= k \int_{\lambda_b}^{\lambda_a} \phi(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
Z &= k \int_{\lambda_b}^{\lambda_a} \phi(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda
\end{aligned} \tag{3.22}$$

이를 matrix form으로 일반화하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = k \int_{\lambda_a}^{\lambda_b} \phi(\lambda) \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} d\lambda \tag{3.23}$$

여기서 $\lambda_a = 380 \text{ nm}$, $\lambda_b = 780 \text{ nm}$
 k = 정규화 정수, Y = 측광량에 대응
 $\phi(\lambda) = \begin{cases} S(\lambda)\rho(\lambda) \\ S(\lambda)\beta(\lambda) \\ S(\lambda)\tau(\lambda) \end{cases}$
 $S(\lambda)$: 광원의 분광분포
 $\rho(\lambda)$: 분광 반사율
 $\beta(\lambda)$: 분광 방사율
 $\tau(\lambda)$: 분광 투과율

이다. 그리고 F 의 xy 색도 좌표는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned}
x &= \frac{X}{X+Y+Z} \\
y &= \frac{Y}{X+Y+Z} \\
z &= \frac{Z}{X+Y+Z}
\end{aligned} \tag{3.24}$$

가시광 영역의 spectrum locus를 CIE xy 좌표로 나타내면 다음의 그림 3.8에서와 같다. 복합색의 좌표는 가시광 영역의 spectrum locus 범위의 안쪽에 존재한다. 또한 CIE xy 좌표계에서 색 $C_1(x_1, y_1)$ 과 $C_2(x_2, y_2)$ 를 가색한 $C = (C_1+C_2)$ 의 좌표는 두 점 (x_1, y_1) 과 (x_2, y_2) 를 잇는 직선상에 존재한다.

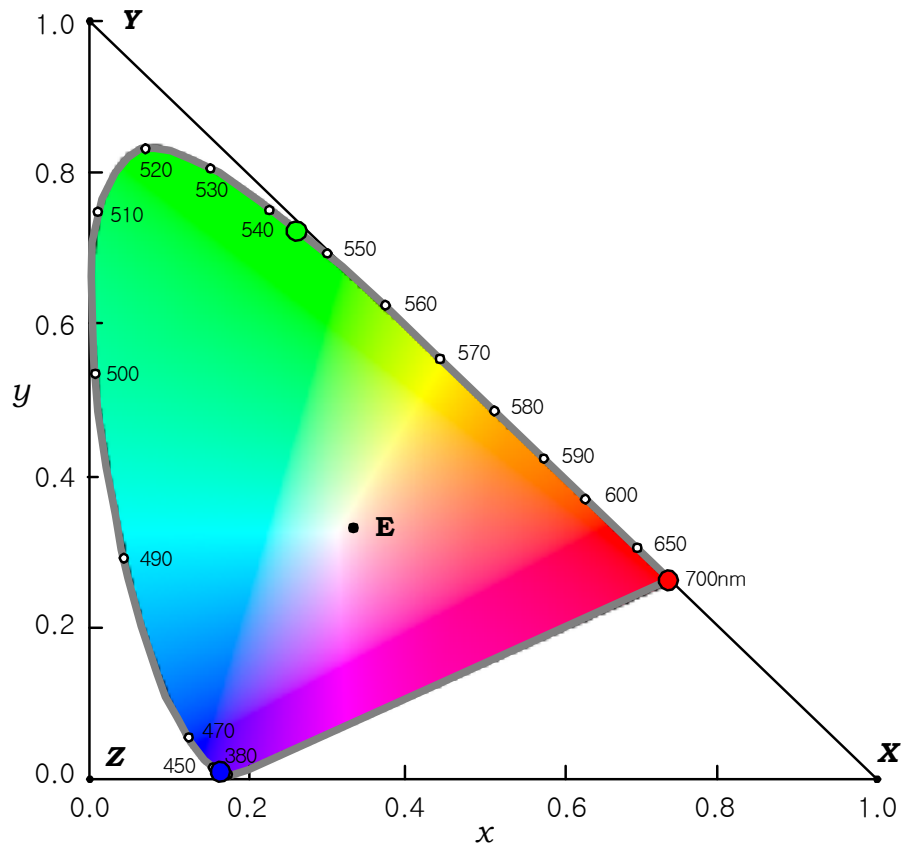
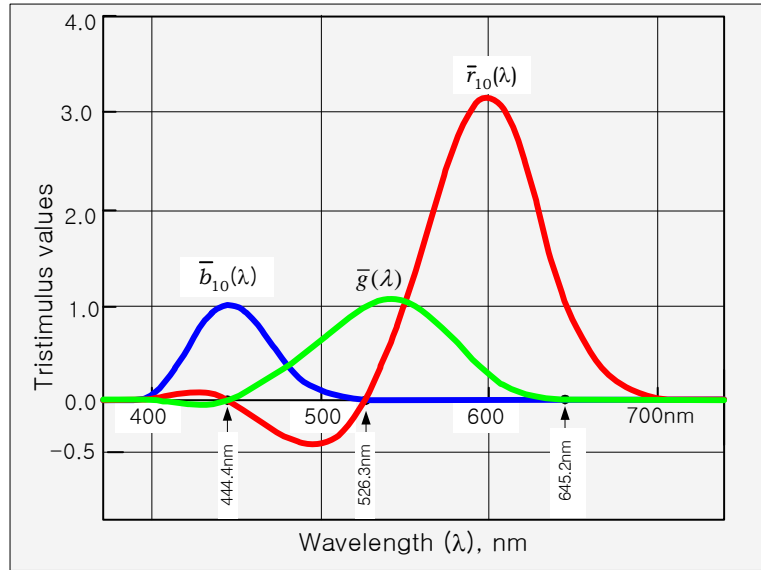


그림 3.8 Chromaticity diagram of CIE 1931 standard colorimetric observer in the transformed system of imaginary primary stimuli \mathbf{X} , \mathbf{Y} , \mathbf{Z} .

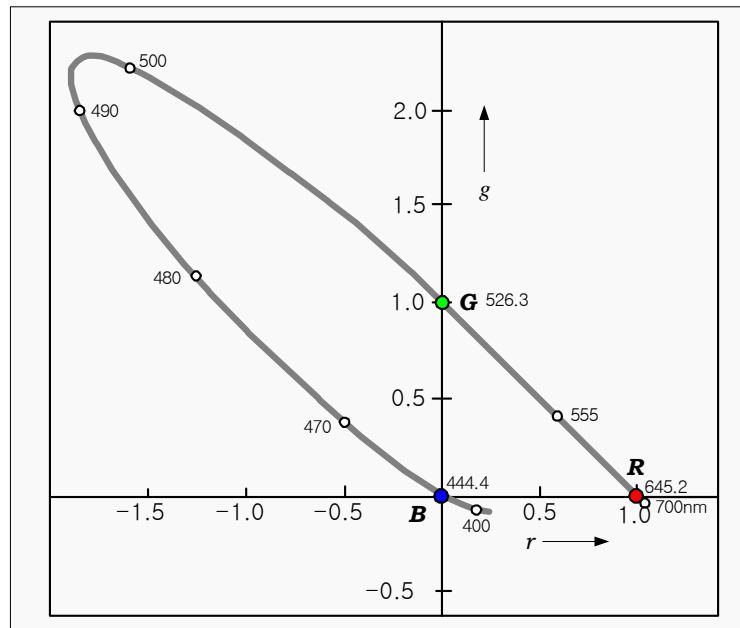
3.2.4 CIE 1964 Supplementary standard colorimetric system

CIE 1931 standard colorimetric 시스템은 2° 시야에 대한 것인데, 일반적인 television system 에서는 시야각이 약 10° 전후이므로 CIE 에서는 1964년에 10° 시야에 대한 color matching function과 이에 대응하는 색도도를 보충적인 표준으로 결정하였다.

그림 3.9에 CIE 1964 supplementary standard colorimetric system을 보였다. 이 그림에서 R, G, B 3원 자극의 단위는 단위 방사 파워이고, X,Y,Z 3원 자극의 단위는 equal energy stimulus E 의 색도 좌표가 $x=y=1/3$ 이 되도록 고정한 것이다.

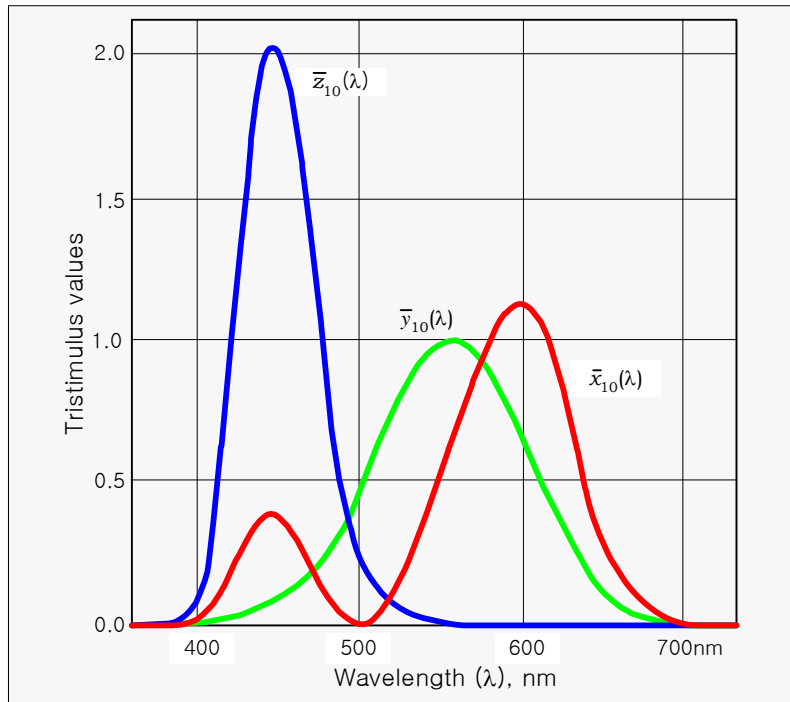
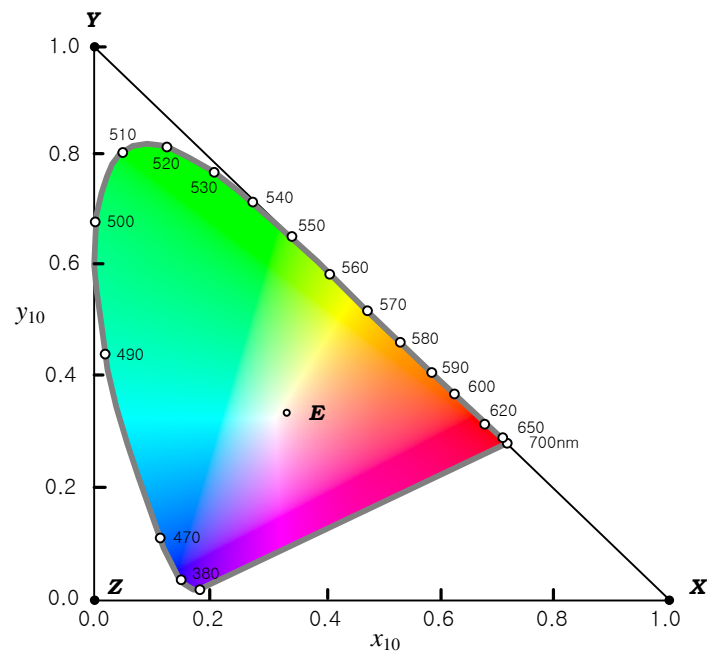


(a) $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$, $\bar{b}_{10}(\lambda)$ color matching functions.



(b) RGB chromaticity diagram.

그림 3.9 Color matching functions and corresponding chromaticity diagram of the CIE 1964 supplementary standard colorimetric observer in the system of real primary stimuli R, G, B, and in the transformed system of imaginary primary stimuli X, Y, Z. (a) $\bar{r}_{10}(\lambda)$, $\bar{g}_{10}(\lambda)$, $\bar{b}_{10}(\lambda)$ color matching functions. (b) RGB chromaticity diagram. (c) $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ color matching function. d) XYZ chromaticity diagram of the visible spectrum locus.

(c) $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ color matching function.

(d) XYZ chromaticity diagram of the visible spectrum locus.

그림 3.9 (Continued)

3.2.5 색도 좌표의 물리적 측정

여러가지 방법이 있으나 가장 보편적인 template를 이용한 xy 색도 좌표 측정의 개념적 원리도를 그림 3.10에 보였다.

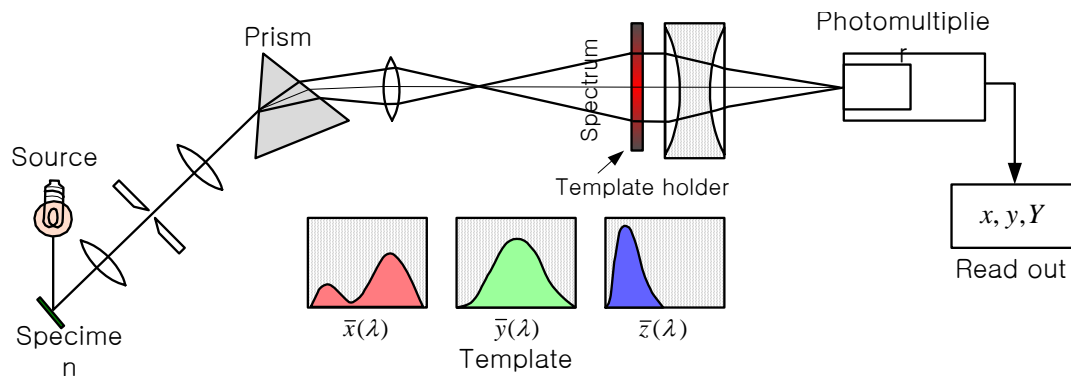


그림 3.10 Schematic diagram of a template colorimeter.(adapted from *Color Science*)

3.3 Uniform Color Space (UCS)

그림 3.11은 xy 좌표계에서 시각 특성상 동일한 색차로 느끼는 좌표 범위를 10배 확대하여 나타낸 것이다. 이와 같이 xy 색도 좌표상에서는 일정한 거리가 균등한 색차를 나타내지 못한다. 시각적 색차가 좌표상의 거리에 비례해서 균등하게 나타나도록 변환한 색도 좌표계를 Uniform Color Space라 한다.

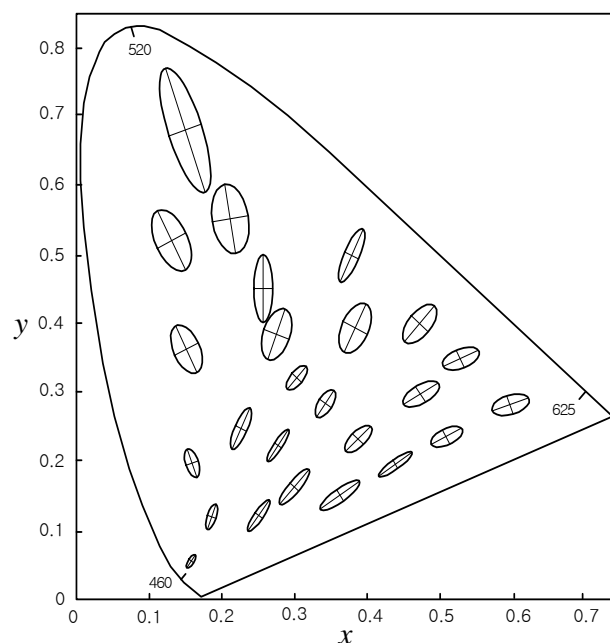


그림 3.11 Ellipses of equally perceptible color differences.(From MacAdam, The axes of plotted ellipses are 10 times their actual lengths).[3]

3.3.1 CIE UCS Diagram^[4]3.3.1.1 CIE 1960 UCS diagram (uv 좌표계)

1960년 CIE에서 잠정적으로 추천한 uv 직각 좌표계로써 다음에 의해 주어진다.

$$u = \frac{4x}{-2x+12y+3} = \frac{4X}{X+15Y+3Z}, \quad (3.25a)$$

$$v = \frac{6y}{-2x+12y+3} = \frac{6Y}{X+15Y+3Z}. \quad (3.25b)$$

그리고 상기 식의 역변환은 다음과 같이 주어진다.

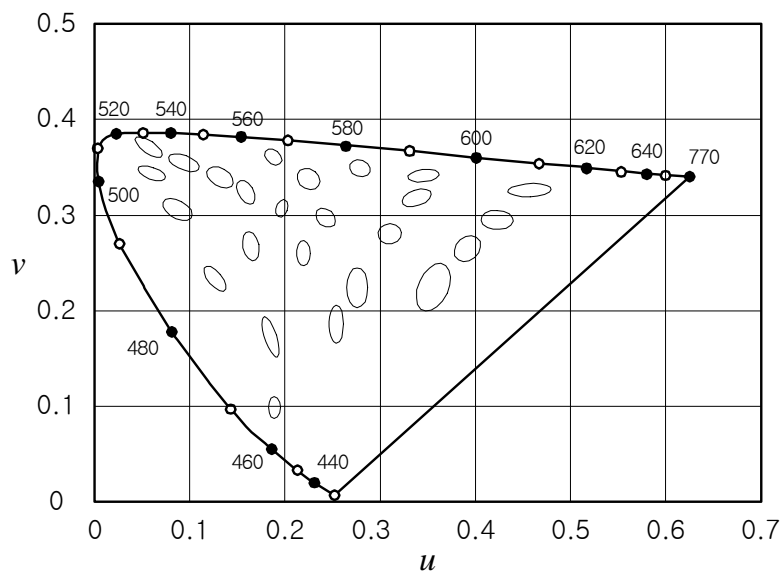
$$x = \frac{6u}{6u-16v+12}, \quad y = \frac{4v}{6u-16v+12} \quad (3.25c)$$

2.3.1.2 CIE 1976 UCS diagram ($u'v'$ 좌표계)

상기 CIE 1960 uv 좌표계에서 v 축의 스케일을 1.5배 확대하면 시각 특성에 더욱 가까워짐으로 CIE 1960 UCS 색도도와 함께 CIE가 채용한 것이다. 현재는 주로 이 좌표계가 널리 이용되고 있다. 색도 좌표 (u', v')는 XYZ 좌표계의 3자극치 X, Y, Z 및 색도 좌표 (x, y)로부터 다음과 같이 주어진다.

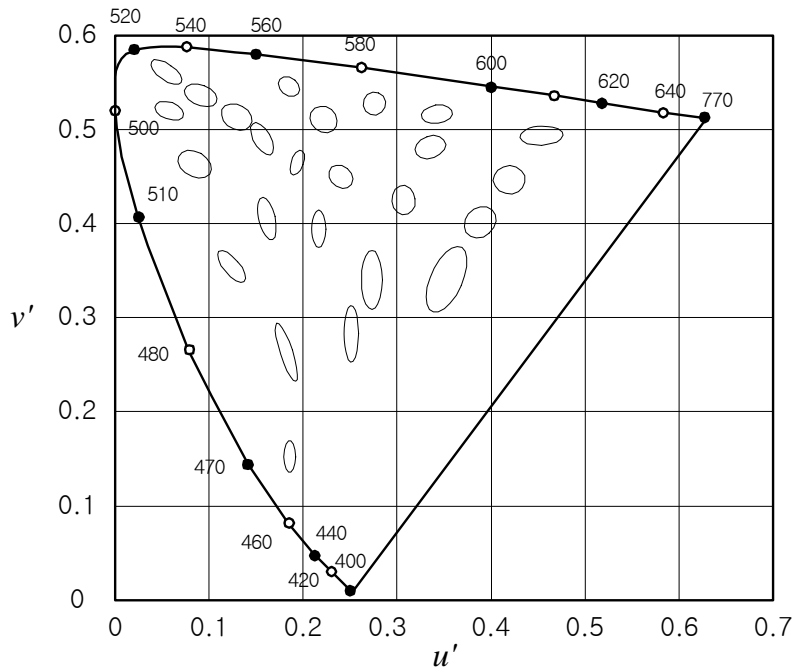
$$u' = \frac{4x}{-2x+12y+3} = \frac{4X}{X+15Y+3Z} \quad (3.26a)$$

$$v' = \frac{9y}{-2x+12y+3} = \frac{9Y}{X+15Y+3Z} \quad (3.26b)$$



(a) CIE 1960 uv UCS diagram.

그림 3.12 CIE 1960 uv and CIE 1976 $u'v'$ UCS diagram.



(b) CIE 1976 $u'v'$ UCS diagram.
그림 3.12 (Continued).

그림 3.12에 CIE 1960 uv 및 CIE 1976 $u'v'$ UCS diagram을 보였다. 그림에서 MacAdam의 편차 타원의 균일성이 개선 되었음을 알 수 있다.

uv 또는 $u'v'$ 좌표계는 linear projective transformation 이기 때문에 xy 색도 좌표계에서 직선이 uv 좌표계에서도 직선으로 나타나는 커다란 이점이 있다. 따라서 가색 혼법에 대한 통상적인 그래픽 룰이 그대로 적용될 수 있다.

3.3.2 $U^*V^*W^*$ 좌표계

이어서 1964년에 CIE가 uv 좌표계의 확장으로 3차원적인 $U^*V^*W^*$ 직각 좌표계를 잠정적으로 추천하였는데 이는 다음과 같다.^[5]

$$\begin{aligned} U^* &= 13W^*(u - u_n) \\ V^* &= 13W^*(v - v_n) \\ W^* &= 25Y^{1/3} - 17 \quad (1 \leq Y \leq 100) \end{aligned} \quad (3.27)$$

여기서 u_n 과 v_n 은 표준의 광 A 또는 D_{65} 와 같은 기준 백색의 u, v 값이다.

이 좌표계에서 두 점 W^*, U^*, V^* 과 $W^* + \Delta W^*, U^* + \Delta U^*, V^* + \Delta V^*$ 사이의 거리를 대응 자극치들 사이의 감지 크기에 대한 척도 ΔE_{CIE64} 로 정의 하며 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta E_{CIE64} = [(\Delta U^*)^2 + (\Delta V^*)^2 + (\Delta W^*)^2]^{1/2} \quad (3.28)$$

이 좌표계는 광원의 연색성 평가에 이용된다. 또한, W^* 는 명도 지수(lightness index), U^*, V^* 는 색도 지수 (chromaticness index)라 불리며, W^* 는 Munsell value의 10배의 값과 잘 일치한다.

그림 3.13에는 $U^*V^*W^*$ chromatic diagram상에서의 수정 Munsell계의 Value=5에 대한 색좌표를 보였다.

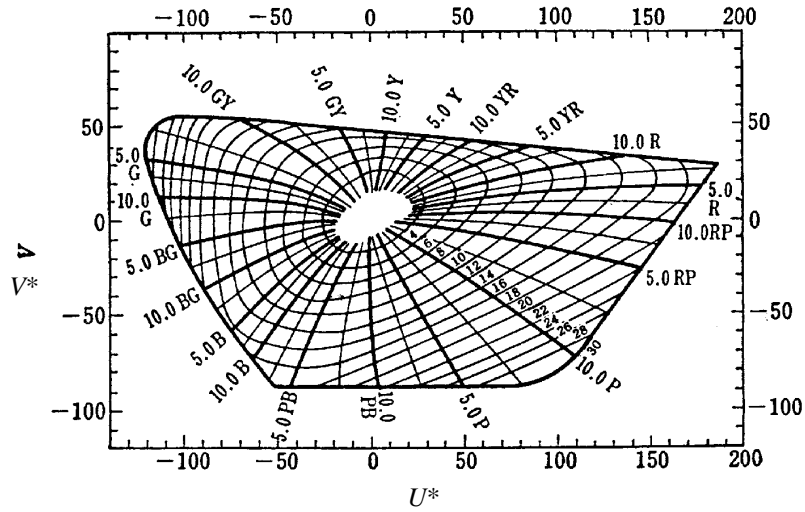


그림 3.13. 수정 Munsell 계의 Value = 5에 대한 U^*V^* chromatic diagram에서의 색 표현. [6]

3.3.3 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 좌표계(CIELUV)

$U^*V^*W^*$ 좌표계에서 V^* 의 스케일을 50% 확장하면 시각적 판단과 더욱 일치함을 알고 CIE는 다음과 같은 새로운 공식을 개발하였다. [5]

$$L^* = 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \quad (3.29a)$$

$$u^* = 13L^* (u' - u'_n) \quad (3.29b)$$

$$v^* = 13L^* (v' - v'_n)$$

여기서

$$u' = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}, \quad v' = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}. \quad (u' = u, \quad v' = 1.5v \text{ 이다})$$

그리고, Y_n, u_n, v_n 은 각각 기준 백색에 대한 Y, u, v 값이다. $Y_n = 100$ 일 때 L^* 는 W^* 와 거의 같다. 한편, 상기식에서 $YY_n \leq 0.008856$ 일 때는 L^* 를 다음과 같이 대치시켜야 한다.

$$L^* = 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \quad (3.29c)$$

그림 3.14에는 CIE $L^*u^*v^*$ color solid를 스케치한 그림을 보였다. 또한 그림 3.15에는 $L^* = 50$ 인 단면에서 MacAdam의 편차 타원을 나타내었다.

또한, $L^*u^*v^*$ 색공간에서 색차에 대한 공식은 다음과 같다.

$$\Delta E_{uv}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2} \quad (3.30)$$

상기식을 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ 색차 공식이라 부른다.

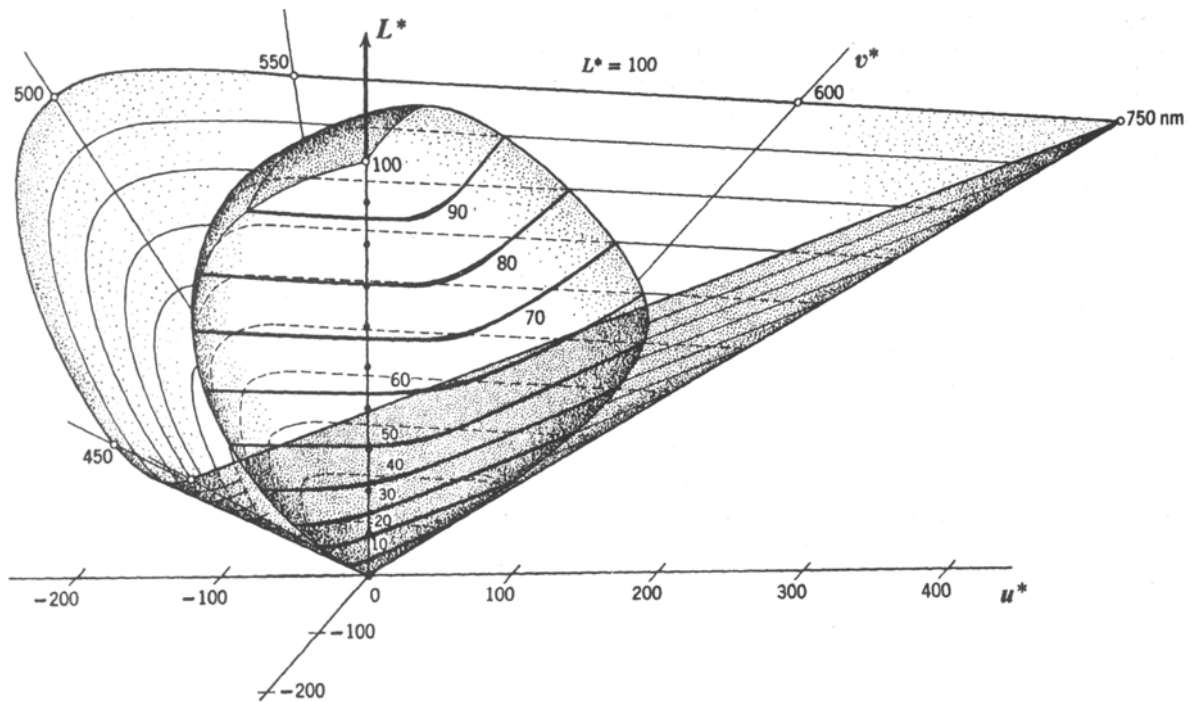


그림 3.14. Sketch of CIE 1976 $L^*u^*v^*$ color space with outer boundary generated by optimal stimuli with respect to CIE standard illuminant D_{65} and CIE 1964 supplementary standard observer.[7]

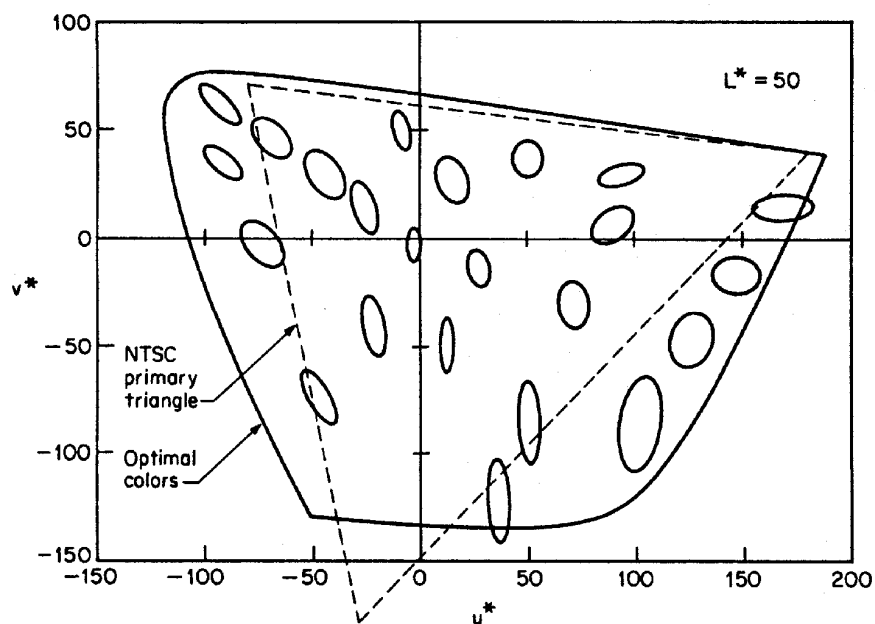


그림 3.15. MacAdam's ellipses plotted in u^*, v^* cross section of the CIE 1976 $L^*u^*v^*$ uniform color space. The triangle formed by the NTSC primaries colors is shown as a dashed line.[5]

3.3.4 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ 좌표계(CIELAB)

CIE가 1976년에 추천한 것으로 명도지수와 지각 색도는 다음과 같이 주어진다.^[5]

$$\begin{aligned} L^* &= 116 \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - 16 \\ a^* &= 500 \left[\left(\frac{X}{X_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} \right] \\ b^* &= 200 \left[\left(\frac{Y}{Y_n} \right)^{1/3} - \left(\frac{Z}{Z_n} \right)^{1/3} \right] \end{aligned} \quad (3.31a)$$

상기식은 X/X_n , Y/Y_n , $Z/Z_n > 0.008856$ 이상 일 때 적용 된다. 이들 값이 0.008856보다 작은 경우에는 다음과 같이 수정된 공식(modified formulae)을 사용한다.

$$\begin{aligned} L_m^* &= 903.3 \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \quad \text{for } Y/Y_n \leq 0.008856 \\ a_m^* &= 500 \left[f \left(\frac{X}{X_n} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) \right] \\ b_m^* &= 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_n} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_n} \right) \right] \end{aligned} \quad (3.31b)$$

여기서, $f(q) = q^{1/3}$ for $q > 0.008856$, $f(q) = 7.787q + \frac{16}{116}$ for $q \leq 0.008856$ 이고, X_n, Y_n, Z_n 은 각각 기준 백색의 X, Y 및 Z 값이다. CIELAB 좌표계에서 L^* 는 CIELUV 공식에서의 L^* 와 동일하다.

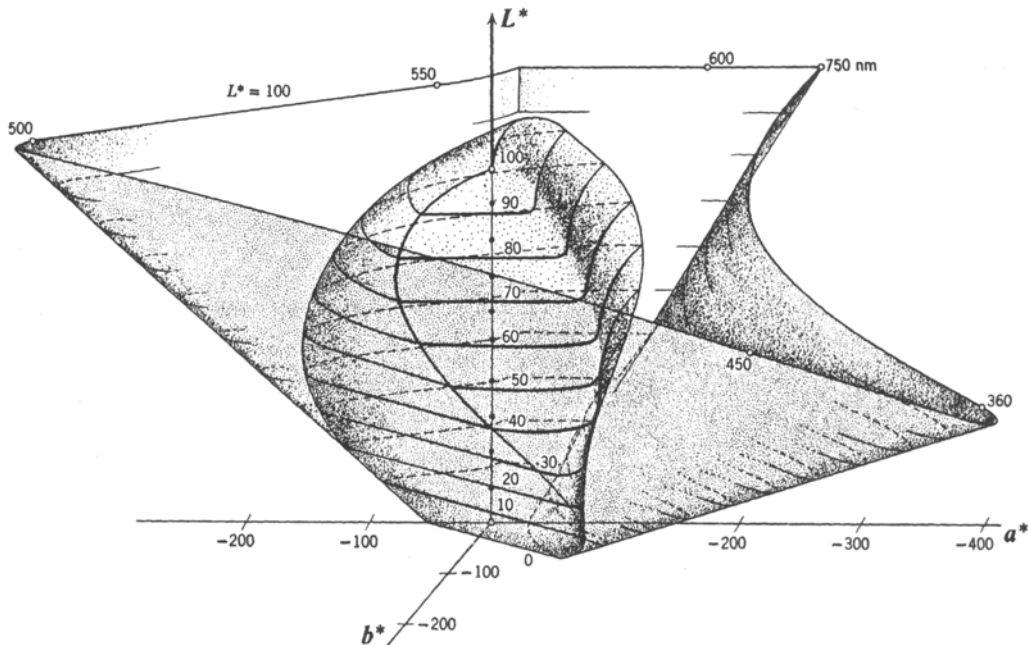


그림 3.16. Sketch of CIE 1976 ($L^*a^*b^*$) color space with outer boundary generated by optimal stimuli with respect to CIE standard illuminant D_{65} and CIE1964 supplementary standard observer.^[7]

한편, $L^*a^*b^*$ 색 공간에서 색차에 대한 공식은 다음과 같다.

$$\Delta E_{ab}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \quad (3.32)$$

CIELAB 좌표계는 동일 크기, 동일 형태의 물체색 간의 차이를 비교하는데 사용된다. 이때, 배경 조건은 화이트와 중간 그레이 사이이며, 평균적인 daylight의 색도와 크게 다르지 않은 광에 관찰자의 눈이 적응된 경우이다. (note 6 on the CIELAB space from CIE publication 15.2, CIE, 1986)

칼러 텔레비전에서와 같이 가색 혼합(additive mixtures) 시스템에서는 CIELUV 공식이 CIELAB 공식보다 더 유용하다. 왜냐하면 CIELUV 좌표계에서는 u^*v^* 좌표계에서와 마찬가지로 가색된 색의 좌표는 두 색의 좌표를 잇는 직선상에서 center of gravity law 를 적용할 수 있기 때문이다.

3.3.5 Hue, Chroma, Saturation

CIELUV 좌표계에서 감각적 상관량인 hue, perceived chroma, saturation 을 근사적으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

CIE 1976 $L^*u^*v^*$ (CIELUV) 에서 hue angle h_{uv}^* 은

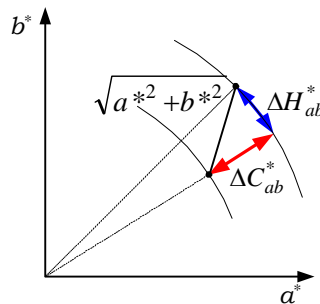
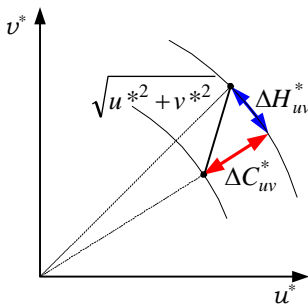
$$h_{uv}^* = \tan^{-1} \left(\frac{v^*}{u^*} \right) \quad (3.33)$$

chroma C_{uv}^* 는

$$C_{uv}^* = [(u^*)^2 + (v^*)^2]^{1/2}. \quad (3.34)$$

saturation s_{uv} 은

$$s_{uv} = 13[(u' - u'_n)^2 + (v' - v'_n)^2]^{1/2} = C_{uv}^* / L^*. \quad (3.35)$$



Total color difference ΔE_{uv}^* 는

$$\Delta E_{uv}^* = [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2]^{1/2}. \quad (3.36)$$

여기서 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ (CIELUV) hue difference ΔH_{uv}^* 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Delta H_{uv}^* = [(\Delta E_{uv}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{uv}^*)^2]^{1/2}. \quad (3.37)$$

칼러 텔레비전의 경우 다음과 같이 lightness에 대해 0.25의 weight를 주어서 계산한다. 즉,

$$(\Delta E_{uv}^*)' = [(0.25\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2]^{1/2}, \quad (3.38)$$

또는

$$(\Delta E_{uv}^*)' = [(0.25\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{uv}^*)^2 + (\Delta H_{uv}^*)^2]^{1/2}. \quad (3.39)$$

텔레비전 시스템에서 일반적인 색에 대해서는 $(\Delta E_{uv}^*)' < 5$ to 8 units 이면 무난하며, 살색에 대해서는 $(\Delta E_{uv}^*)' < 5$ 일 것이 요구된다.^[5]

한편, $u'v'$ 좌표계에서 인접한 두 칼러 샘플간의 색차가 $\Delta E_{u'v'} \geq 0.004$ 이면 시각적으로 구분 가능하고, 두 칼러 샘플이 떨어져 있는 경우에는 색차가 $\Delta E_{u'v'} \geq 0.04$ 이면 그 차이를 감지한다.^[20] $\Delta E_{u'v'} = 0.004$ 의 값을 텔레비전 시스템에서 1 MPCD (minimum perceptible color difference)로 정의 하는 이유는 여기에 있다.

CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (CIELAB) 에서 hue, chroma, 및 색차 공식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} h_{ab}^* &= \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \\ C_{ab}^* &= [(a^*)^2 + (b^*)^2]^{1/2} \\ \Delta E_{ab}^* &= [(\Delta L^*)^2 + (\Delta C_{ab}^*)^2 + (\Delta H_{ab}^*)^2]^{1/2} \\ \Delta E_{ab}^* &= [(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2]^{1/2} \\ \Delta H_{ab}^* &= [(\Delta E_{ab}^*)^2 - (\Delta L^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2} \end{aligned}$$

또는

$$\Delta H_{ab}^* = [(\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 - (\Delta C_{ab}^*)^2]^{1/2}$$

3.3.6 CMC($l:c$) equation

Daniel Malacara, *Color Vision and Colorimetry: Theory and applications*, pp.97-100, SPIE, 2002.

1988년 The Colour Measurement Committee(CMC) of the Society of Dyers and Colourists of Great Britain에서 **CMC($l:c$)** equation으로 알려진 다음과 같은 색차 공식을 제안 하였다.

$$\Delta E_{ab}^* = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{l S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{c S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{S_H} \right)^2 \right]^{1/2},$$

여기서 ΔL^* 은 lightness difference, ΔC_{ab}^* 는 chroma difference, 그리고 ΔH_{ab}^* 는 hue difference 이다. 상기 equation에 의한 tolerance ellipsoids의 semiaxes는 $l S_L$, $c S_C$, S_H dimension을 가지며, S_L 은 luminance L 의 함수로써 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} S_L &= \frac{0.040975 L^*}{1 + 0.01765 L^*} & \text{if } L^* \geq 16 \\ S_L &= 0.511 & \text{if } L^* < 16 \end{aligned}$$

S_C 는 chroma C_{ab}^* 의 함수로써

$$S_C = \frac{0.0638C_{ab}^*}{1+0.0131C_{ab}^*} + 0.638.$$

S_H 는 chroma C_{ab}^* 및 hue h_{ab}^* 의 함수로써

$$S_H = \frac{S_C}{TF - F + 1}$$

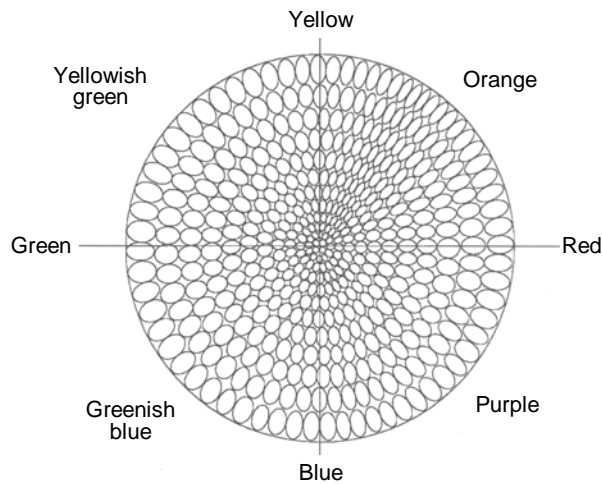
여기서
$$F = \frac{(C_{ab}^*)^2}{[(C_{ab}^*)^4 + 1900]^{1/2}}.$$

$$T = 0.56 + \left| 0.2 \cos(h_{ab}^* + 168^\circ) \right| \quad \text{if } 164^\circ \leq h_{ab}^* < 345^\circ$$

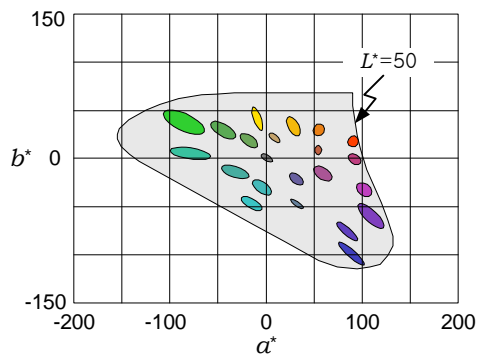
$$T = 0.38 + \left| 0.4 \cos(h_{ab}^* + 35^\circ) \right| \quad \text{if } h_{ab}^* < 164^\circ \text{ or } h_{ab}^* \geq 345^\circ.$$

그리고 대부분의 visual color match에 대해서는 $l=2, c=1$ 가 적절하며 때로는 $l=1, c=1$ 이 사용된다.

CMC($l:c$) 색차 공식에서는 tolerance ellipsoids가 근사적으로 다음의 그림에서와 같이 나타난다.



Tolerance ellipsoids plotted in the a^*b^* plane for $L^*=50$ in the color difference system CMC($l:c$)



Tolerance ellipsoids plotted in the a^*b^* system

3.3.7 CIE 1994 Color Difference Equation

CIE에서 1994년에 CMC(*l:c*) equation에 근거하여 다음과 같은 색차공식 ΔE_{94}^* 을 제안 하였다.

$$\Delta E_{94}^* = \left[\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2}$$

여기서

$$S_L = 1,$$

$$S_C = 1 + K_1 C_{ab\ ref}^*, \quad K_1 = \begin{cases} 0.045 & \text{graphic arts} \\ 0.048 & \text{textiles} \end{cases}$$

$$S_C = 1 + K_2 C_{ab\ ref}^*, \quad K_2 = \begin{cases} 0.015 & \text{graphic arts} \\ 0.014 & \text{textiles} \end{cases}$$

$C_{ab\ ref}^*$: Chroma of the reference color.

그리고 계수 k_L, k_C, k_H 는 parametric factor로써 대부분의 경우

$$k_L = k_C = k_H = 1$$

이며, textile industry에서는 다음의 값을 선호하고 있다.

$$k_L = 2, \quad k_C = k_H = 1$$

CIE가 마련한 CIE94 색차 공식을 사용하기 위한 기준 조건은 다음과 같다.

- (1) Illumination: CIE illuminant D65 simulator
- (2) Illuminance: 1000 lux
- (3) Observer: Normal color vision
- (4) Background: Uniform, achromatic, $L^*=50$
- (5) Viewing mode: Object
- (6) Sample size: Greater than 4° visual angle
- (7) Sample separation: Direct edge contact
- (8) Sample color-difference magnitude: 0 ~ 5 CIELAB units
- (9) Sample structure: No visually apparent pattern or non uniformity

3.3.8 CIE 2000 Color Difference Equation

The color difference, or ΔE , between a sample color $L_2 a_2 b_2$ and a reference color $L_1 a_1 b_1$ is:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right)^2 + R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C} \right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H} \right)}$$

여기서

$$\bar{L}' = (L_1 + L_2) / 2$$

$$C_1 = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \ , \ C_2 = \sqrt{a_2^2 + b_2^2}$$

$$\bar{C}' = (C_1 + C_2) / 2$$

$$G = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\bar{C}^7}{\bar{C}^7 + 25^7}} \right)$$

$$a_1' = a_1(1 + G) \ , \ a_2' = a_2(1 + G)$$

$$C_1' = \sqrt{a_1'^2 + b_1'^2} \ , \ C_2' = \sqrt{a_2'^2 + b_2'^2}$$

$$\bar{C}' = (C_1' + C_2') / 2$$

$$h_1' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_1 / a_1') & \tan^{-1}(b_1 / a_1') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_1 / a_1') + 360 & \tan^{-1}(b_1 / a_1') < 0 \end{cases}$$

$$h_2' = \begin{cases} \tan^{-1}(b_2 / a_2') & \tan^{-1}(b_2 / a_2') \geq 0 \\ \tan^{-1}(b_2 / a_2') + 360 & \tan^{-1}(b_2 / a_2') < 0 \end{cases}$$

$$\bar{H}' = \begin{cases} (h_1' + h_2' + 360) / 2 & |h_1' - h_2'| > 180 \\ (h_1' + h_2') / 2 & |h_1' - h_2'| \leq 180 \end{cases}$$

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

$$\Delta h' = \begin{cases} h_2' - h_1' & |h_2' - h_1'| \leq 180^\circ \\ h_2' - h_1' + 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' \leq h_1' \\ h_2' - h_1' - 360^\circ & |h_2' - h_1'| > 180^\circ; h_2' > h_1' \end{cases}$$

$$\Delta L' = L_2 - L_1$$

$$\Delta C' = C_2' - C_1'$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C_1' C_2'} \sin(\Delta h' / 2)$$

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

$$S_C = 1 + 0.045\bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.045\bar{C}'T$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \left\{ - \left(\frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25} \right)^2 \right\}$$

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

$$R_T = -2R_C \sin(2\Delta\theta)$$

$$K_L = K_C = K_H = 1 \text{ default.}$$

3.3.6 CMY 표색계

C (Cyan), M (magenta), Y (Yellow)는 각각 R, G, B의 보색이며, 감법 혼색의 3원색이다. CMY는 인쇄나 사진 등의 색재현을 감법 혼색에 의존하는 분야에 사용되는 표색계이다. RGB로부터 CMY에의 변환은 일반적으로 다음과 같이 주어진다.^{[8],[9]}

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

3.3.7 YIQ 표색계

1953년 미국의 NTSC (National Television System Committee)는 텔레비전 방송용 표준 표색계로서 **YIQ** 표색계를 채용하였다. **YIQ** 표색계는, CIE의 **XYZ** 표색계를 기본으로 하고 있으며, 휘도 정보는 **Y** 신호에 포함시키고, **Y** 신호중에 **R, G, B**의 비율은 CRT 디스플레이 **RGB** 인광체의 표준 비시감도 곡선에 맞추고 있다. 또한 색상과 채도 정보를 보내기 위해서 **R, G, B**와 **Y**와의 차이인 색차 신호를 이용하며, **I**는 orange에서 cyan, **Q**는 green에서 magenta까지의 색을 포함한다. 휘도 신호와 색차신호로 나누어 송신하기 때문에 칼러 텔레비전 수상기로 수신한 경우에는 칼러로 영상을 재현시키고, 흑백 수상기로 수신한 경우에는 휘도 신호만을 사용하여 올바른 흑백 영상이 재현되도록 하고 있다.

RGB 신호로부터 **YIQ**에의 변환은 다음과 같이 주어진다.^[9]

$$\begin{bmatrix} Y \\ I \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} +0.299 & +0.587 & +0.114 \\ +0.596 & -0.274 & -0.322 \\ +0.211 & -0.522 & +0.311 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

시각 특성으로써 색도차에 대한 변별력은 휘도차에 대한 변별력보다 낮은 성질이 있다. Bedford^[10]는 실험에 의해 인간 시각의 색도차 시력은 휘도차 시력의 40% 이하이고, 또한 색도가 green-blue의 색차에 대해서는 휘도차 시력의 19%에 불과하다는 성질을 발견했다. 따라서 NTSC 시스템 규격에서는 그림 3.17에서와 같이 **I**축 색신호를 광대역(1.2MHz)으로, **Q**축 색신호를 협대역(0.5MHz)으로 전송한다.

그러나 최근에는 (**R-Y**)축이 광대역 축에 더욱 가깝고, (**B-Y**)축이 협대역 축에 매우 가까운 것이 알려져 있다.^[11] $2^\circ \times 2^\circ$ 크기의 색도 샘플의 윤곽을 저역 통과 필터로 흐리게 한 후, 선예한 휘도 신호를 중첩해가면 색 번짐이 마스크 되어 보이지 않게 된다. 그림 3.18은 색도영역에 따라서 상기와 같이 색 번짐이 감지되지 않는 색신호의 대역폭을 조사한 것이다. 이 그림에서 표시된 색도 신호의 대역폭은, 명암 정보 10 cd/m^2 에 대해서, 색번짐이 감지되지 않는 색신호 대역을 표시

한 것이다.

($R-Y$)축에 가까운 cyan-red 색도 영역이 광대역이고, ($B-Y$) 축에 가까운 blue-yellow 색도 영역이 협대역임을 알 수 있다. 현재의 디지털 텔레비전 시스템에서 YIQ 신호 대신에 전송 원색으로 Y , ($R-Y$), 및 ($B-Y$) 신호를 사용하는 이유도 여기에 있다.

3.4 Color Appearance System(顯色系)^[13]

혼색계가 심리 물리색을 나타내는 시스템인데 비해서, 현색계는 지각색을 표시하는 시스템이다. 지각색은, 예를 들면 착색 물체의 표면을 볼 때 인간이 심리량으로써 지각하는 색으로, 미리 여러 종류의 착색 물체(색표)를 작성하고, 그것을 색상, 밝기, 채도라는 심리적인 색의 속성에 의해 계통적으로 배열한 체계를 현색계라 한다.

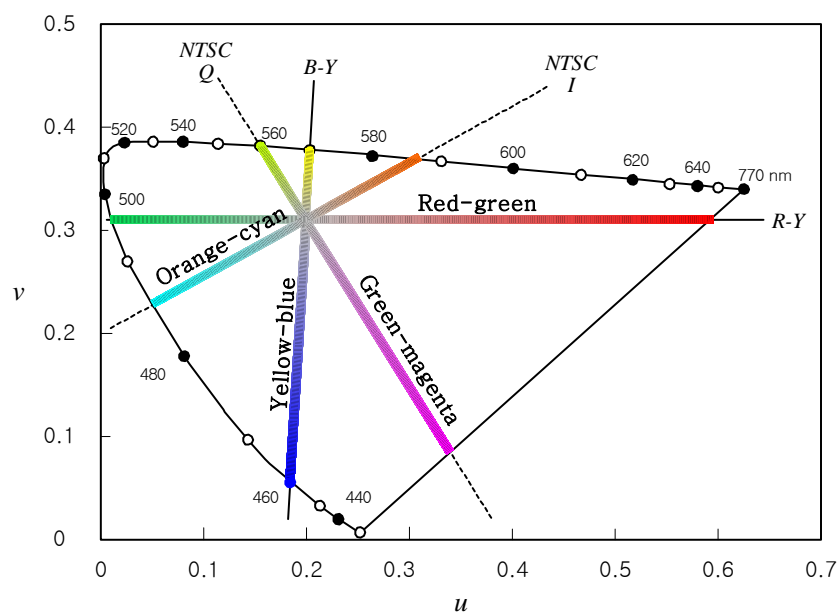


그림 3.17 NTSC 텔레비전 시스템의 IQ 신호 축 및 ($R-Y$), ($B-Y$) 신호축.^[12]

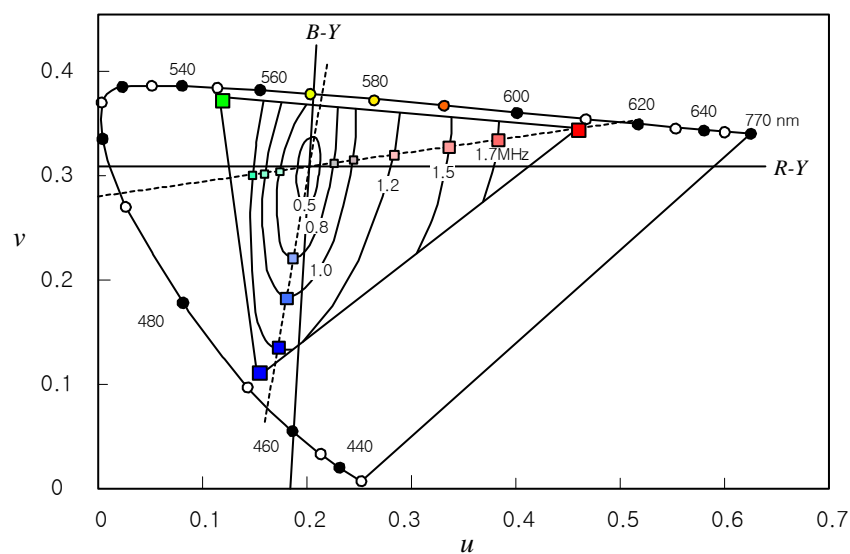


그림 3.18 색번짐이 감지 되지 않을 색신호의 광대역폭 및 협대역폭^[11]
(시거리: 4H, 평균휘도: 10 cd/m², 주위조건: Dark)

3.4.1 Munsell 표색계

미국의 화가 A.H. Munsell 이 제창한 색의 배색법이다. 색을 심리량을 기준으로 색상, 채도, 명도의 3 속성으로 정의한다.

3.4.1.1 색 상

Munsell 은 색의 차이를 구별하는 속성으로써 색상(Hue)를 정의하며 H 로 약기한다. 먼저, R(Red), Y(Yellow), G(Green), B(Blue), P(Purple)의 다섯 가지의 색을 기본 색상으로하고, 이들을 하나의 원(색상환)상에 5 등분하여 배열한다. 다음에 다섯 가지 기본 색상에의 중간에 YR, GY, BG, PB, RP 가 되는 색을 배치한다. 마지막으로 이웃하여 만나는 색상의 사이를 10 등분하여 체적으로 100 가지 색상을 구성한다. 이 때, 각 색상은 기본 색상의 기호 R, Y, G, B, P 및 이들의 중간 색상 기호 중간에 YR, GY, BG, PB, RP 와 1 부터 10 까지의 숫자를 조합하여 부르며, 기본 색상과 중간 색상에는 모두 숫자 5 가 붙여져 5R, 5YR, 5Y 등으로 나타낸다. Munsell 의 색상환을 그림 3.19 에 보였다. 상기 색상환은 Munsell 이 정한 하나의 기준이며, 각 R, Y, G, B, P 는 적, 황, 녹 등에 대응시킨 기호이지만, 통상적으로 사용하고 있는 색의 감각과 반드시 일치하는 것은 아니다. 예를 들면 통상 “Red,” 라고 부르는 색은 거의 5R 과 일치하나, “Blue,” 는 5B 보다 오히려 5PB 에 가깝다.

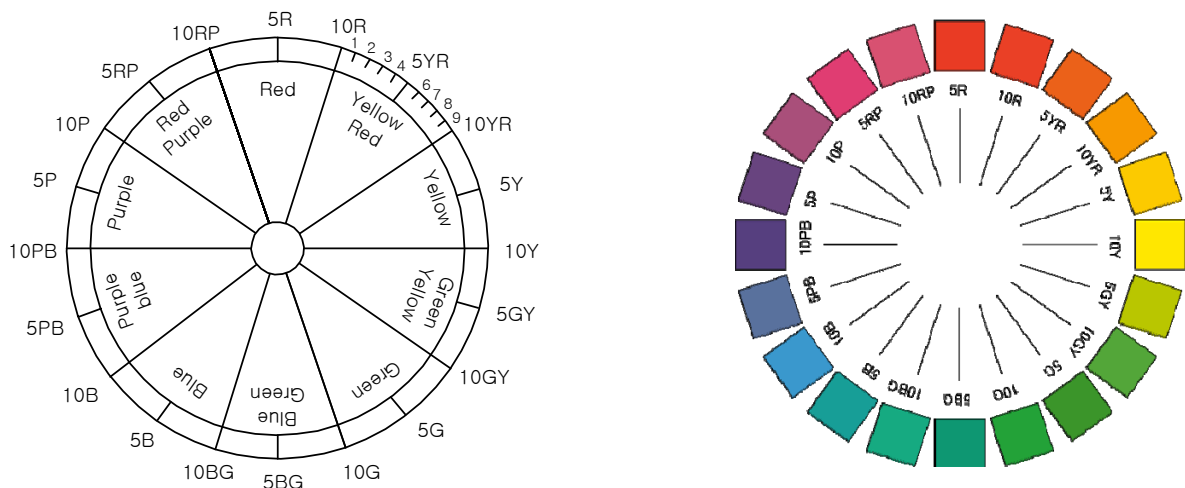


그림 3.19 Munsell 의 색상환.

3.4.1.2 명 도

색의 밝기를 나타내는 척도로써 명도(Value)를 정의하고 V로 표시한다. 반사율 0%인 이상적인 black의 명도를 0, 반사율 100%의 이상적인 white를 명도 10으로하고, 그 사이의 명도를 심리적으로 10 등분하여 0, 1, 2, 3, ..., 10과 같이 수치로 나타낸다. 표기 방법은 / 앞에 명도 값을 붙여, 2/5/ 등으로 나타낸다.

일반적으로 인간 시각의 밝기 감각은 반사율에 비례하지 않는다. 예를 들면 인간 시각은 반사율이 약 20% 정도의 것을 중간 밝기로 인식한다. Munsell 명도 척도는 거의 반사율의 평방근에 비례하고 있다. 그림 3.20에 휘도와 명도를 나타내는 Munsell value와의 관계를 그래프로 나타내었다.

3.4.1.3 채 도

색의 신선도의 정도를 나타내는 척도로써 채도 (chroma)를 정의 하며, C 로 표기한다. 각 색상, 명도 마다 무채색(회색)을 채도 0 으로 정의하고, 가장 신선한 색 (단색광, single spectrum 의 광) 까지를 심리학적으로 등 간격으로 구분하여 표현한다. 표기 방법은 /4, /8, 등으로 나타낸다. 채도의 최대치는 색상, 명도에 따라 다르다.

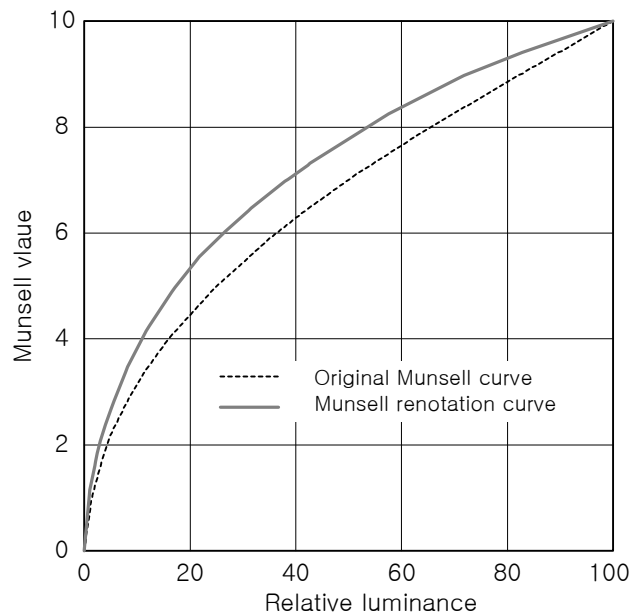


그림 3.20 상대 휘도에 따른 Munsell value

3.4.1.4 Munsell 색 입체

채도를 중심으로 부터의 거리로 나타낸 색상환을 명도마다 작성하고, 이것을 명도가 낮은 것부터 순서대로 동심원상에 겹치면, Munsell의 속성은 그림 3.21에서와 같이 원통형의 색 입체로써 표현할 수 있다. 모든 물체색은 이 색 입체의 어느 곳인가에 위치하며, 그 색은 Munsell의 3 속성에 의해 HV/C, 즉 5R4/3과 같이 표기한다.

RGB 신호 등으로 컬러 디스플레이 등에 색을 표시하는 경우에, 그 시각적 효과를 직감적으로 잡기 쉽도록 하기 위해서 RGB 신호 값을 일단 모델화 한 색입체에 투영하고, 그의 색상(H: hue), 채도(S: saturation), 명도(I: intensity)를 평가하는 경우가 있는데, 이를 위한 변환을 HIS 변환이라 한다.

3.4.1.5 Munsell 색표

상기 정의에 근거하여 그림 3.22에 보인 것과 같은 Munsell 색표가 작성되어 시판되고 있으며, 색표와 비교하여 임의의 물체색을 Munsell 표색계로 추정할 수 있다. Munsell 색표는 직물, 플라스틱, 페인트 등의 색 주문이나 생산에 주로 사용된다.

Munsell 기호에는 Munsell Book of Color에 의한 수치의 경우와, OSA (Optical Society of America)에 의한 수정 Munsell 기호의 경우가 있으며, 양자는 색 자체에 약간의 차이가 있으므로 주의를 요한다. 현재 쓰이고 있는 것은 모두 수정 Munsell 값이다.

3.4.1.6 무채색과 유채색

흰색이나 회색과 같이 어느 색상에도 속하지 않는 색을 총칭하여 무채색이라 한다. 무채색은 채도라는 속성을 가지지 않으며 명도 만에 의해 결정된다. 무채색에 대해서 3 속성을 모두 가지는 색을 총칭하여 유채색이라 한다. 무채색은 N(neutral)을 사용하여 N5, N7, 등과 같이 나타낸다.

3.4.1.7 Munsell 계 색의 CIE 표색계 표현

참고로 그림 3.23에서 그림 3.25까지는 xy , $L^*u^*v^*$, 및 $L^*a^*b^*$ 색도도상에 Munsell 계의 등색상(색상 일정) 궤적을 및 등채도 (채도 일정) 궤적을 각각 나타낸 것이다.

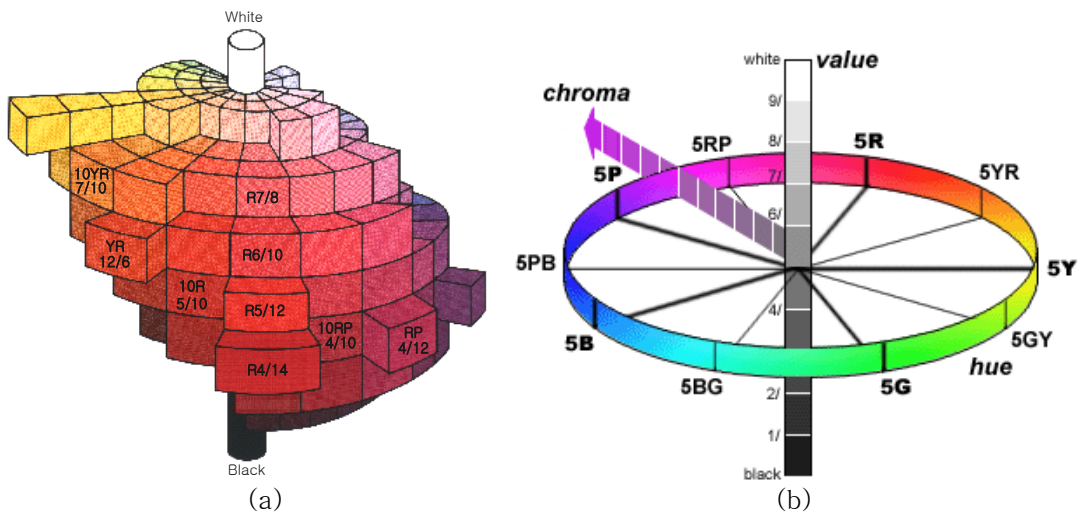
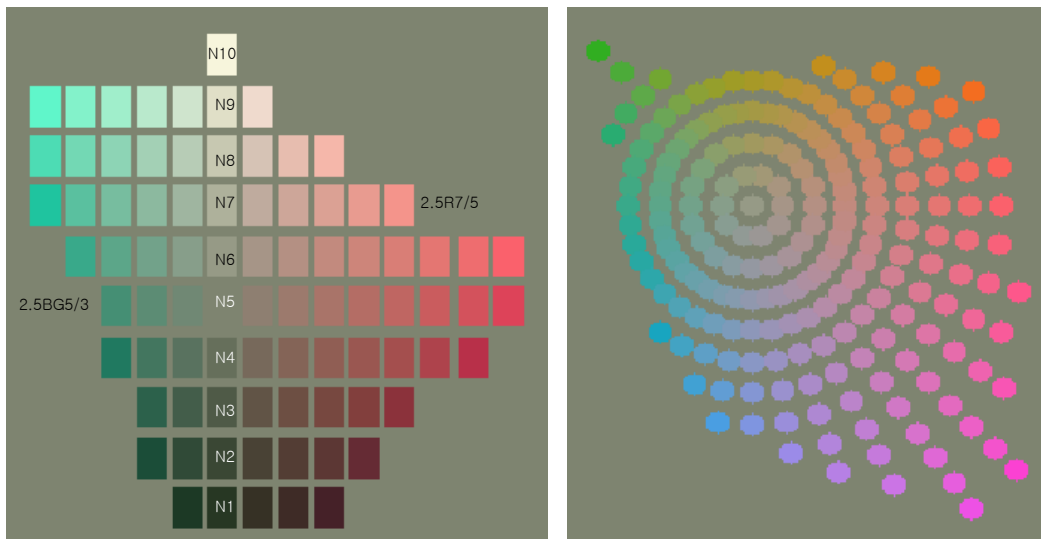


그림 3.21 (a) Munsell color solid, (b) conceptual frame work of the Munsell color order system.



(a) 2.5BG 및 2.5R 색상의 단면 (b) Value 6 of the 단면 색상환
그림 3.22 Munsell 색표의 배열.^[14]

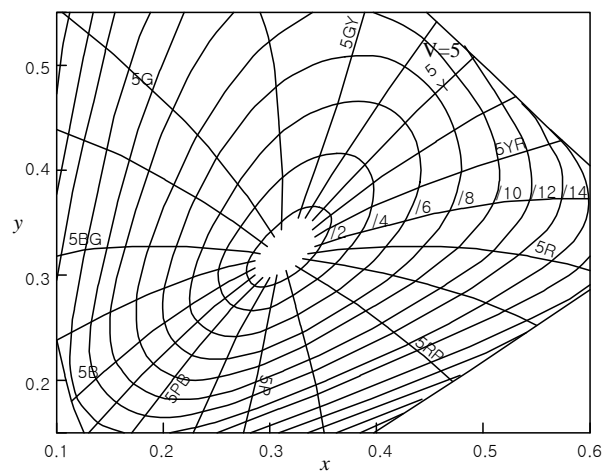


그림 3.23 xy 색도도상에 있어서의 Munsell 계의 등색상 및 등채도 궤적.^[15]

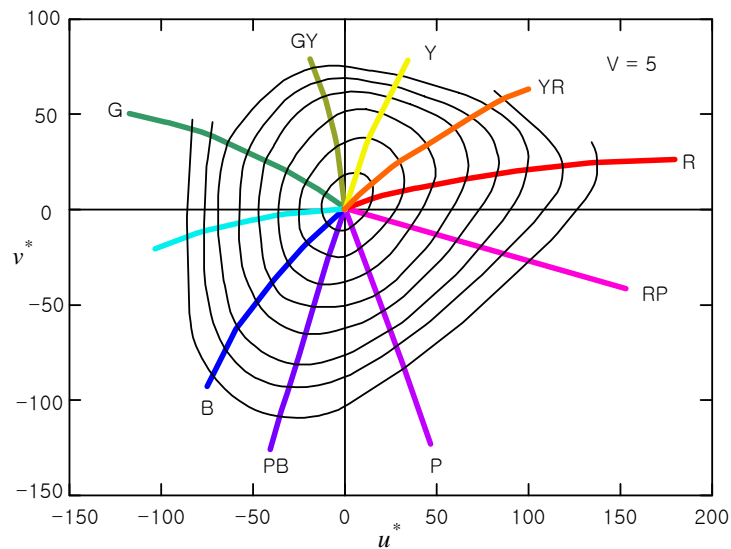


그림 3.24 $L^*u^*v^*$ 색도도상에 있어서의 Munsell 계의 등색상 및 등채도 궤적.^[16]

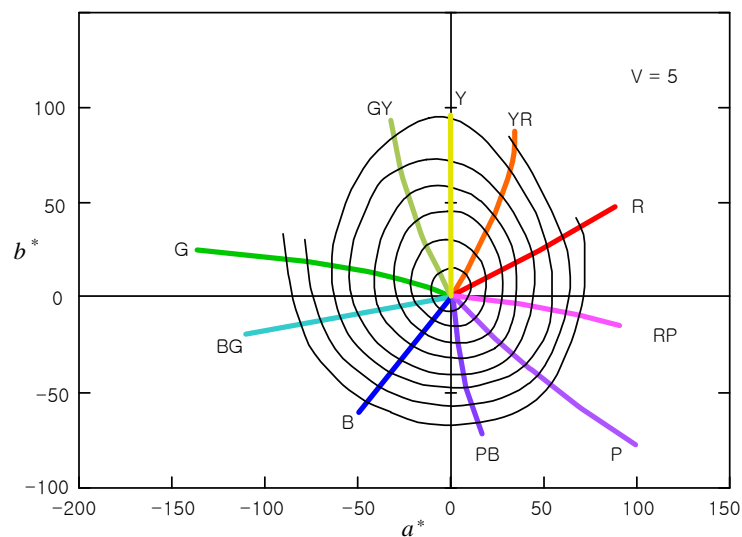
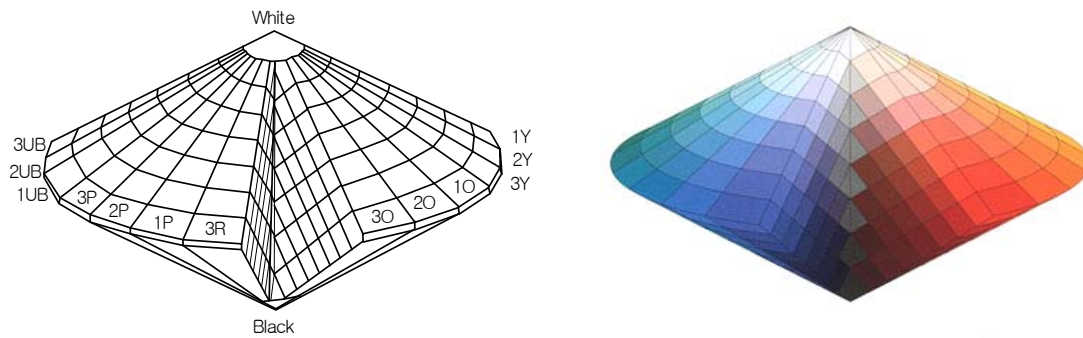
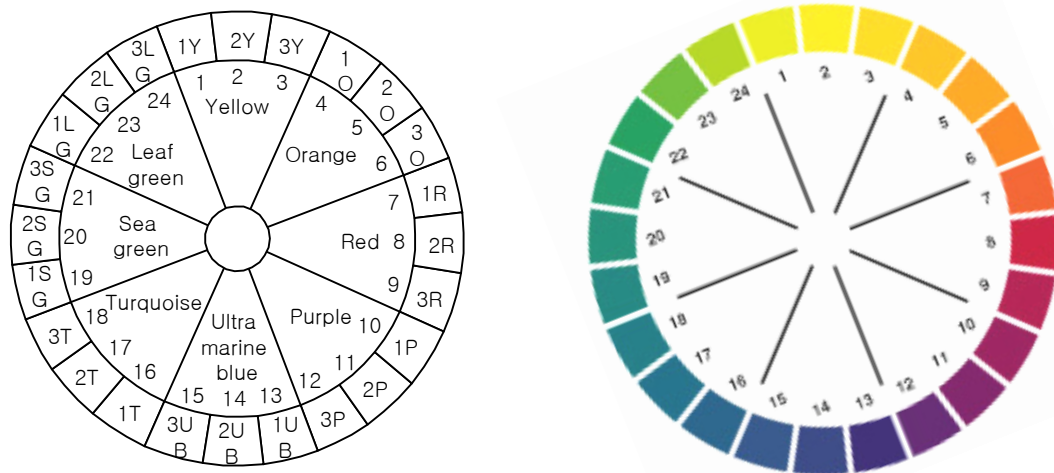


그림 3.25 $L^*a^*b^*$ 색도도상에 있어서의 Munsell 계의 등색상 및 등채도 궤적.^[16]

3.4.2 Ostwald 표색계

독일의 화학자 W. Ostwald에 의해 작성된 표색계를 Ostwald 표색계라 한다. Munsell 표색계가 심리적인 고찰에 의해 작성된 것에 비해, Ostwald 표색계는 심리 물리적인 고찰에 근거하여 작성된 것으로 오히려 혼색계에 가깝다. Munsell 표색계와 마찬가지로 색입체를 형성하나, 그림 3.26에 보인 것처럼 white와 black을 상하단으로 하는 무채색 축을 중심축으로 하는 복원추체의 입체를 가진다.

원추체의 원주상에는 그림 3.27에서와 같이 24색상의 순색이 배열된다. 이를 Ostwald의 색상환이라 한다. 상측 원추의 표면에는 순색과 백색이 여러 비율로 혼합된 색이 배열된다. 하측의 원추의 표면에는, 순색과 흑이 여러 비율로 혼합된 색이 배열된다. 또한, 입체의 내측에는 순색과 백색과 흑이 여러 비율로 혼합된 색이 배열되어 있다.

그림 3.26 Ostwald 의 색 입체.^[13]그림 3.27 Ostwald 의 색상환.^[13]

*Problems with both Munsell and Ostwald system: Based on subjective color comparisons.

Standard samples can fade and degrade system.

Complementary colors are not on opposite side of value axis

3.5 광원의 연색성 (Color rendering properties of light sources)^[17]

3.5.1 연색성

분광 분포가 다른 광원으로 동일한 물체를 조명한 경우, 일반적으로 그 물체색은 달리 보인다. 조명된 물체로부터 보이는 색을 연색이라 한다. 그리고 연색에 영향을 미치는 성질을 광원의 연색성이라 한다.

광원의 연색성 평가에는 충실도에 의한 것과 선호성에 의한 것이 있다. 통상은 충실도에 기초한 다음의 방법에 의해 산출되는 연색성 평가수로 평가한다.

3.5.2 CIE 연색성 평가

CIE 는 1955 년에 광원의 연색성 평가방법 제 1 판을 권고하였으나, 그 후, 색순응 보정 방법의 수정과 수치의 정확도를 올린 제 2 판을 권고하였다.

3.5.2.1 시험색

CIE 연색성 평가 시험색은 모두 14 색이 있고, 그림 3.28 에 보인 것과 같은 분광 반사율이 수치적으로 정의되어 있다. 이들 중, No.1 에서 No.8 까지는 명도 6 의 중채도의 색(Munsell chroma 4 - 8)이며 평균 연색 평가수를 산출하기 위해서 사용된다.

No.9 에서 No.12 까지는 고채도의 적, 황, 록, 청색이다. 특히 No.11 은 나뭇잎의 녹색, No.13 은 금발 백인의 피부색을 각각 대표하고 있다. No.15 는 일본인 여성의 얼굴색으로 일본의 JIS 에서 추가된 것이다.

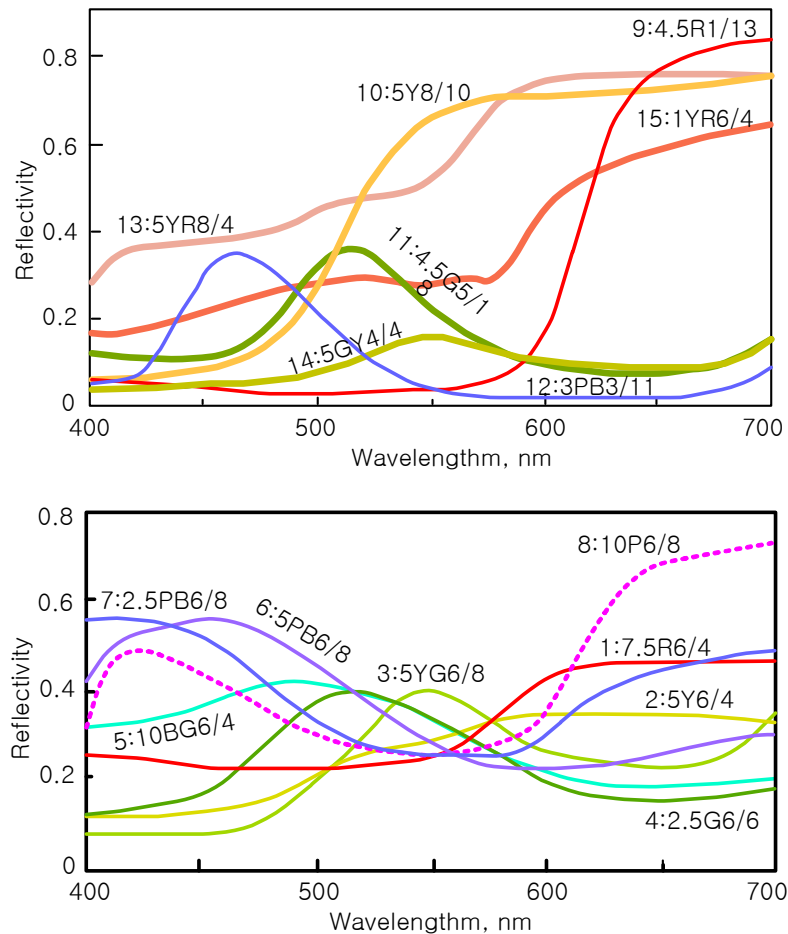


그림 3.28. CIE 연색성 평가 방법에 사용되는 시험색의 분광 반사율.

3.5.2.2 기준의 광

기준이 되는 광원은 광원의 상관 색온도 T_c 가 $T_c < 5000 \text{ K}$ 에서는 흑체의 광을, $T_c \geq 5000 \text{ K}$ 에서는 CIE 합성 day light(주광)로써, T_c 와의 차이가 5 MK^{-1} 이내의 것을 선택한다.

3.5.2.3 연색 평가수

개개의 시험색에 대해서 평가수를 특수 연색 평가수라 하며, 시험색 No.i 에 대해서 기호 R_i 로 나타낸다. 기준 광과의 CIE 1964 $W^*U^*V^*$ 색공간에 있어서 색차를 이용하여 다음의 식으로 산출한다.

$$R_i = 100 - 4.6\Delta E_i$$

$$\Delta E_i = [(W_{ki}^* - W_{ri}^*)^2 + 169\{W_{ki}^*(u'_{ki} - u_r) - W_{ri}^*(u_{ri} - u_r)\}^2 + 169\{W_{ki}^*(v'_{ki} - v_r) - W_{ri}^*(v_{ri} - v_r)\}^2]^{1/2} \quad (3.42)$$

여기서 W_{ri}^* , W_{ki}^* 는 각각 기준광 및 시험광에 의한 시험색의 명도 지수이고, 시감 반사율 Y 로부터 다음의 식으로 구한다.

$$W^* = 25Y^{1/3} - 17 \quad (3.43)$$

또한 u_r , v_r 및 u_{ri} , v_{ri} 는 각각 기준광 및 기준광에 의한 시험색의 uv 색도 좌표이다. 그리고 u'_{ki} , v'_{ki} 는 시험광에 의한 시험색의 uv 색도 좌표에 색순응 보정을 행한 값이다.

시험 광원의 평균 연색 평가수는 R_a 로 표시하고, 시험색 No.1 에서 No.8 까지의 특수 연색 평가수의 평균치로써 다음과 같이 산출한다.

$$R_a = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 R_i \quad (3.44)$$

연색 평가수는 시험광의 상관 색온도에 근사하는 기준광에 의한 시험색의 색과 완전히 일치할 때 100으로 나타낸 상대치이며, 네거티브의 값을 가질 수 없다.

3.6 색채의 심리적 성질

3.6.1 색지각에 있어서 자극면적의 효과^[18]

색각 정상인이라 할지라도, 색자극의 면적이 매우 작아지면 2 색의 식별만 가능케 되는 제3색맹이라 불리는 색각 이상의 상태에 가까워 진다. Middleton과 Holmes는 시각 2'과 1'의 시표를 이용하여 지각되는 색도의 변화를 조사한 결과를 그림 3.29에 보였다. 이 그림으로부터 면적이 작아질수록 모든 색은 orange-greenish blue의 직선상에 가까워지며, 더욱 작아지면 회색으로 느껴진다.

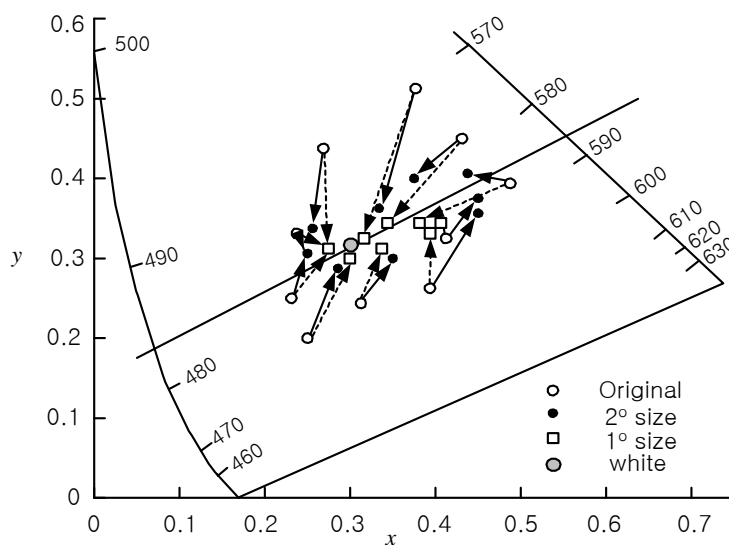


그림 3.29. 시표의 크기와 색지각 (Middleton 과 Holmes, 1949)^[19]

상기 성질은 컬러 텔레비전에서 휘도 신호에 비해 색신호의 대역을 좁게 보내는데 응용되고 있다. 이와 같이 인간 시각은 색 자극을 주어도 조건에 따라 색을 지각 못하는 경우가 있지만, 한편으로는 색 자극을 특별히 주지 않아도 색을 지각하는 경우가 있다.

3.6.2 기억색 (Memory color)

인간은 일상 생활에서 접하는 물체에 대해서 그 물체 특유의 색을 기억하고 있으며, 이를 기억색이라는 개념으로 가지고 있다. 예를 들면, 사람의 피부색이나, 하늘 색, 초목의 색 등을 색표로부터 쉽게 찾아낸다. 이들 색에는 분포가 있으나 사람마다 공통적인 경향이 있다.

그러나 기억색은 실제의 색과는 다르며, 일반적으로 기억색의 채도 명도가 실제의 색보다 높다. 그림 3.30 은 여러 물체에 대한 기억색이 실제의 색과 어느 정도로 다른지를 Bartleson^[21]이 측정한 예를 보인 것이다. 기억색은 선호색 재현이라는 문제와 관계가 깊으며, 색채 화상 기술상 특히 주의해야 할 문제이다.

3.6.3 진출색, 후퇴색, 팽창색, 수축색

물체는 그 색에 의해 가까이 보이기도 하고 멀리 보이기도 한다. 가까이 보이는 진출색은 파장이 긴 색이고, 멀리 보이는 후퇴색은 파장이 짧은 색이다.

또한 색에 따라 크게 보이는 팽창색, 작게 보이는 수축색은 밝기에 의존한다. 따라서 명도가 높은 노란색은 크게, 명도가 낮은 청색은 작게 보인다.

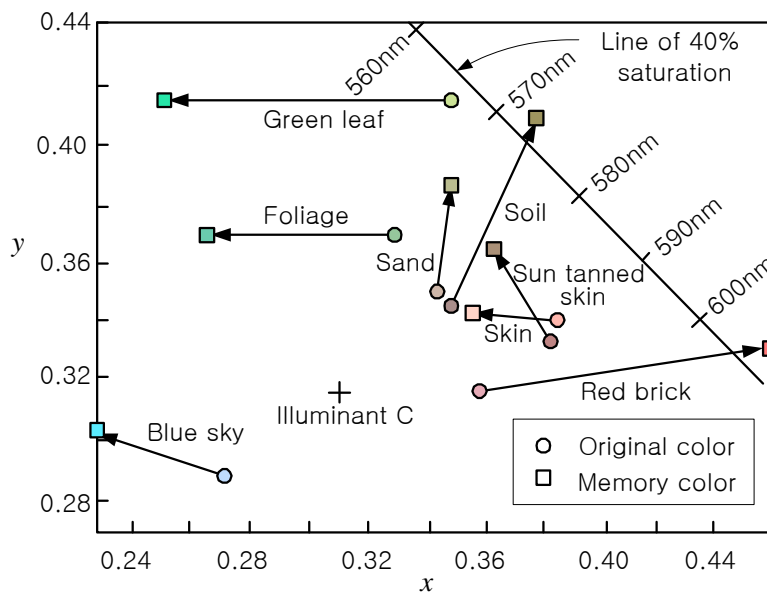


그림 3.30 기억색의 측정 예(Bartleson, 1960). 화살표 시작점이 실제의 색, 끝점이 기억색^[21]

3.6.4 색의 온도감

색은 온도감과 직접 관련되며 중량감 등에도 관련 된다. 일반적으로 장파장 계의 색상은 따뜻하게 느껴지고, 단파장의 색상은 차갑게 느껴진다. 그러나 단순히 색만을 볼 때와 물체의 색으로 보는 경우에는 동일한 감정이 동일한 정도로 느껴지는 것은 아니다.

참 고 문 헌

- [1] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color Science* 2nd Edition, chap.3, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [2] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2nd Edition, pp.583, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [3] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2nd Edition, pp.308, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [4] Daniel Malacara, *Color Vision and Colorimetry*, pp.84-89, SPIE Press, Bellingham, Washington USA, 2002.
- [5] K. Blair Benson and Jerry C. Whitaker, *Television Engineering Handbook*, pp. 2.38-2.42, McGraw-Hill, 1992.
- [6] 宮川, 渡部, *画像エレクトロニクスの基礎*, pp. 126, コロナ社, 1975 年.
- [7] Günter Wyszecki, W.S. Stiles, *Color science* 2nd Edition, pp.165-169, John Wiley & Sons, New York, 1982.
- [8] Henry R. Kang, *Color Technology for Electronic Imaging Devices*, pp.29-32, SPIE Press, Washington, 1997.
- [9] Keith Jack, *Video Demystified*, chap.3, San Diego, HighText, 1993.
- [10] A.V. Bedford, "Mixed highs in color television," IRE, vol.38, no.9, 1950.
- [11] *テレビジョン画像情報工学ハンドブック*, テレビジョン学会編, pp.71-73, オーム社, 1990.
- [12] 高薄一弘, *カラー画像と画質評価*, pp.118, 技術情報協会, 東京, 1992.
- [13] 高木幹雄, 下田陽久, *画像解析ハンドブック*, pp.103-109, 東京大學出版部, 1991.
- [14] <http://www.uni-mannheim.de/fakul/psycho/irtel/cvd/cvd3.html>
- [15] *テレビジョン画像情報工学ハンドブック*, テレビジョン学会編, pp.21, オーム社, 1990.
- [16] A. R. Robertson, The CIE 1976 color-difference formulae, *Color Res. & Appl.* vol. 2, pp. 7-11, 1977.
- [17] *テレビジョン画像情報工学ハンドブック*, テレビジョン学会編, pp.22-23, オーム社, 1990.
- [18] 宮川, 渡部, *画像エレクトロニクスの基礎*, pp.136, コロナ社, 1975 年.
- [19] W. E. K. Middleton, and M. C. Holmes, "The apparent colors of surfaces of small subtense, a preliminary report," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 39, pp. 582-592, 1949.
- [20] *Flat Panel Display Measurements Standard*, Version 2.0, pp.249, VESA (Video Electronics Standards Association), June 1, 2001.
- [21] C. J. Bartleson, "Memory colors of familiar objects," *J. Opt. Soc. Amer.*, vol. 50, pp. 73-77, 1960.