

## 표색계를 이용한 액정 프로젝션 시스템의 색재현

김지홍

(주) Multiware & Image

(1998년 3월 4일 받음, 1998년 12월 1일 수정본 받음)

3판식 액정 프로젝션 시스템의 색재현 개선을 위한 색분리/합성 광학계의 설계 방법으로서, 다양한 시청 조건하에서 인간의 색지각 특성을 고려하여 색순응과 표시색을 이용한 최적의 색재현 구현에 대해 기술한다. 이를 위해 3차원 균등 색공간에서 재현 색영역의 체적을 성능 지수로 선정하고 이를 최대화시키는 설계 방법을 제안한다. 또한, 3판식 액정 프로젝션 시스템의 색재현 원리와 표색계 모델에 대해 기술하고 최적화 문제를 색채학적으로 제시한 후, 적용 예로서 2종류의 시청 조건에 대해 Dichroic Mirror의 경계 파장의 최적 설계치를 구하였다.

### I. 서 론

대화면, 고해상을 실현하는 프로젝션 시스템은 전면투사형(Front Projection Type), 배면투사형(Rear Projection Type)으로 구분할 수 있으며, CRT와 액정을 이용한 제품들이 치열한 사업 전개를 하고 있다. 프로젝션 TV의 화질을 결정짓는 주요 요소로는 최대 휘도와 contrast, 해상도, 잡음, 계조 및 색조의 재현성 등이 있으며, HDTV와 같은 고해상의 display에서는 선명한 색, 농담부의 정확한 표현, 자연스러운 색, 기호성 등도 무시할 수 없는 요소가 된다. 색감이나 색의 선명성을 위해서는 색순도 향상을 통한 색재현 영역의 확보가 필요하다. 그러나, 색순도 향상을 위한 설계는 휘도에도 영향을 미치므로, 휘도와 색도를 모두 고려하여 인간의 시각에 가장 효과적인 색재현을 구현하여야 한다. 예를 들면, 순도 개선을 위한 설계가 휘도의 감소를 수반한다면, 결과적으로 휘도의 저하 및 peak white의 색온도 변화로 인하여 원하는 만큼 색감의 증가나 선명한 원색을 얻을 수 없는 경우가 발생한다.<sup>[1]</sup> 3판식 액정 프로젝션 TV의 경우, 색재현 성능은 주로 색분리/합성 광학계와 광원의 특성에 의해 결정되는데, 현재의 설계 방법은 설계자의 직관적 실험에 의해, 순도가 증가하는 동시에 휘도 감소로 인한 색감의 저하가 심각하지 않은 타협점을 선정하고 있다. 따라서, 보다 체계적인 색분리/합성 광학계의 설계 방법 및 기술의 확보가 요구되며, 나아가서, 다양한 기술을 응용한 Display제품의 색재현 성능의 개선 연구가 필요하다. 본 논문에서는, 인간의 시각 특성을 잘 나타낸 표색계(Color Appearance) 모델과 CIE 균등색공간(Uniform Color Space)을 이용하여, 단순한 순도(Saturation)만이 아니라, 상대적인 시각 인식량으로서의 채도(Chroma)를 최대화시키는 설계 방법을 제시한다. 이를 위해, Projection TV 시스템의 구성과 인간의 색지각 특성을 간단히 기술한 후, 3판식 액정 프로젝션 TV를 대상으로 색분리/합성 광학계의 최적화 문제 구성과 설계 방법, 실험 결과를 기술한다.

### II. System의 구성과 표색계

프로젝션 TV는 회로부, 광학부와 기구부로 구성되어, 총합적인 설계 기술에 의해 화질이 결정된다. 기본적인 색재현은 주로 광학적 성능에 의해 결정되며, 색재현성 개선을 위해 회로적인 신호 처리도 가능하다. 3판식 액정 프로젝션 시스템의 경우, 기본적으로 광원, 색분리/합성부, 액정부와 투사렌즈의 광학계로 구성되어 있고,<sup>[2]</sup> 광원으로부터의 백색광은 색분리 광학계에 의해 Red, Green Blue의 3기본색으로 분리된 후, 각 색에 해당하는 액정에 의해 변조된 후, 스크린상에 투사, Full Color의 화상을 재현한다. 그림 1은 이 같은 프로젝션 시스템의 기본 구조를 간단히 도해한 것이며, 배면투사형이나 전면투사형이냐에 따라 반사형 스크린 혹은, 투과형 스크린을 사용한다. 그림 2에 보인 배면투사형은 전면투사형과는 달리 어느 정도 밝기의 주위 환경하에서도 시청이 가능하며, 가정용 대화면 TV로서 적합하다.<sup>[3]</sup>

구체적으로 3판식 액정 프로젝션 TV의 색재현 영역은 램프의 발광 특성과 색분리/합성에 사용되는 Dichroic Mirror/Filter의 파장 투과/반사 특성에 의해 결정된다. 이 때, 투과/반사의 관점에서 Dichroic Mirror와 Dichroic Filter의 용어가 혼용되나, 본 논문에서는 Dichroic Mirror로 표현하기로 한다. 램프의 발광 특성은 기술적으로 제한되어 있기 때문에, Dichroic Mirror의 분광 투과/반사율을 어떻게 조정하느냐가 순도뿐 아니라 색재현 성능을 결정짓게 된다.<sup>[4]</sup> 그림 3은 Red색과 Green색의 분리용으로 사용되는 Dichroic Mirror의 분광 투과 특성의 예를 보인 것으로, 여기서 Red 색의 경우를 생각해 보면, 경계 파장을 크게 함으로써 기본색의 순도(Saturation)-주파장 성분의 에너지 비율-를 증가시킬 수 있으며, 전체 에너지의 양, 즉, 휘도는 감소해도 순도의 개선은 가능하다. 물론 이 경우 Green색은 반대의 현상이 발생한다. 따라서, 이 Dichroic Mirror의 설계는 Red와 Green색의 기본색을 포함하는 모든 색에 영향을 주게 되므로, 이 색의 재현 성능을 최선으로 하는 Dichroic Mirror의 설계가 필요하다.

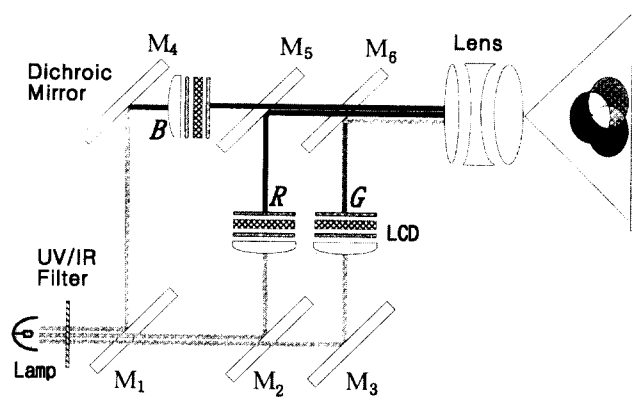


그림 1. 3판식 액정 프로젝션의 원리와 스크린상의 색합성.

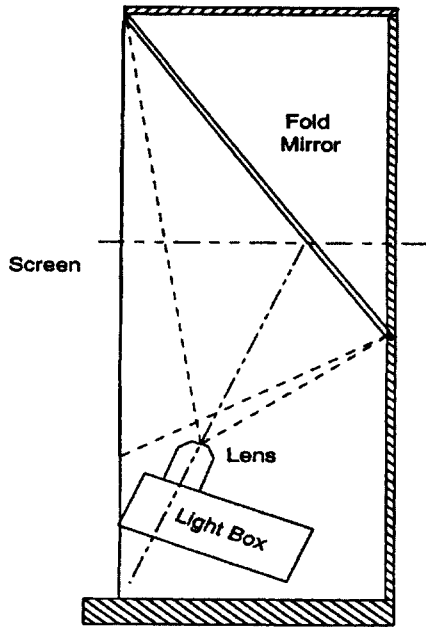


그림 2. 배면 투사형의 구조 예.

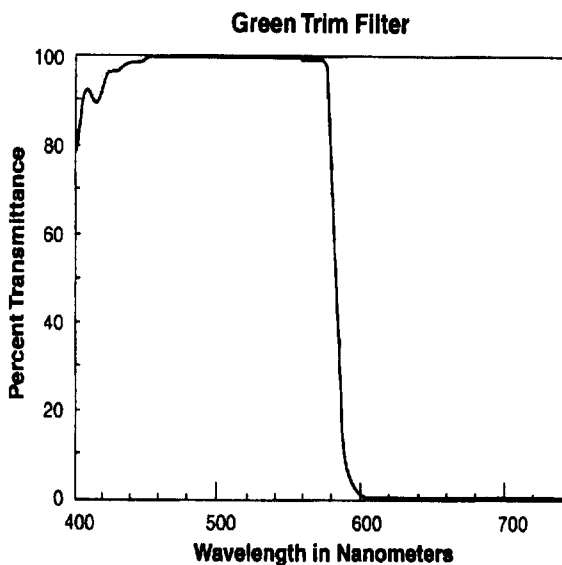


그림 3. R/G 분리용 Dichroic Mirror의 분광 투과율 예.

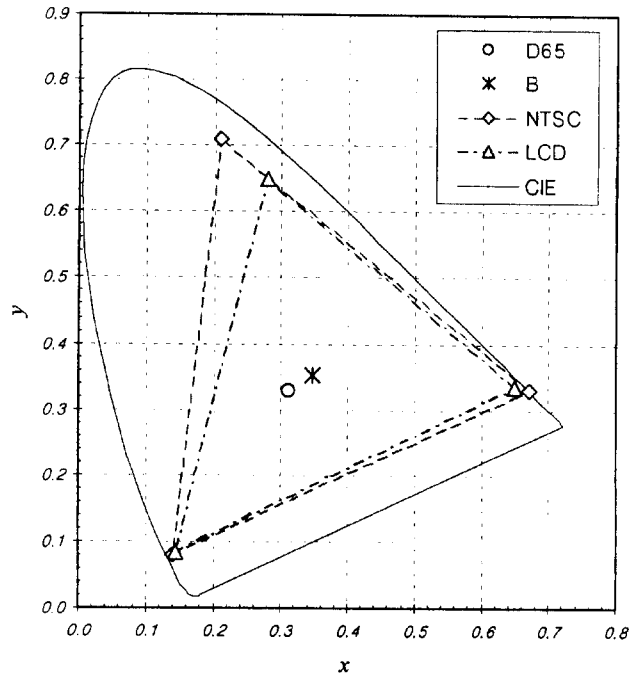


그림 4. CIE 1931(x, y) 색도표.

이외의 광학적 요소들, 예를 들면, Screen과 투사 렌즈 등은 분광 반사/투과 특성이 거의 Flat하여 색도에는 거의 영향을 안 미치므로 본 논문에서는 무시하기로 한다.

빛은 함수 형태의 에너지의 파장 분포 특성으로 표시되나, 시각적 감각량으로서의 색은 3차원적인 물리량으로 표시할 수 있다. 색채 실험에 의한 색의 3요소(색상, 명도, 채도 등) 및 생물학적 실험 결과가 이와 일치되고 있다. 색을 나타내는 물리량으로서의 CIE XYZ 3차극치가 사용되며, 3차극치를 구할 때 사용되는 CIE Color Matching Function  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$ ,  $\bar{z}(\lambda)$  는 각각 Red, Green, Blue색의 감도 특성과 유사하다. 특히,  $\bar{y}(\lambda)$ 는 정확하게는 휘도를 구할 때 사용하는 인간의 시각도 곡선으로서, 시각적으로는 Green 색으로 보인다. 표현 가능한 색의 범위, 즉, 색영역 (Color Gamut)은 그림 4에 보인 1931 CIE (x,y) 색도표(Chromaticity Diagram) 혹은, 1976 CIE (u,v) 색도표를 사용하여 성능을 비교할 수 있으며,<sup>[5]</sup> 이 색도표에서 기준백색점 ( $x_w, y_w$ )으로부터의 거리가 순도로서 인간이 시각적으로 느끼는 색감에 영향을 주는 값이다. 그림 4에는 NTSC방식의 기본색의 색도 규격에 의한 색영역과 대표적인 LCD 디스플레이의 색영역이 CIE에서 표준으로 정한 광원의 색도 좌표와 함께 예시되어 있다.

색은 Hue(색상), Colorfulness(색감), Brightness(밝기) 3가지의 속성이 있다. 인간이 느끼는 지각색(Perceived Color)은 물체로부터 눈에 입사되는 빛의 3차극치 이외에도 색순응을 포함하며, 암순응하에서의 상대적 밝기가 명도 (Lightness)가 되며, 색순응 현상에 의한 상대적 Colorfulness를 채도(Chroma)라고 한다. 같은 순도의 색을 갖는 물체는 그 밝기가 클수록, 주변 밝기가 어두울수록, 명도가 클수록 더 큰 채도를 갖게 된다. 이 같이 색에 대한 상대적 지각량을 나타내는 시스템은

로서 1976 CIELUV-또는 CIELAB- 균등색공간이 사용되고 있으며,<sup>[6]</sup> 입사되는 빛의 3차극치와 기준백색의 휘도/색도값으로부터 명도와 색도 정보로서의 3차원 공간상의 좌표점 ( $L^*, u^*, v^*$ )을 구할 수 있다. 또한 다음 장에서 보이는 바와 같이 균등색공간의 채도  $C^*$ 도 구할 수 있다. 균등색공간은 색차의 균등성 확보를 목표로 표준 조건하에서의 실험을 통하여 개발된 색좌표계로서, 표준 조건이 아닌 시청 조건에서는 정확한 표시색을 나타내지는 못한다.<sup>[7]</sup>

최근에는 인간에게 어떻게 보이는가를 정확히 보여 주는 표색계 모델이 많이 제안되고 있으므로, 이를 이용해 표준 조건이 아닌 시청 조건하에서의 액정 프로젝션 시스템의 표시색의 재현 성능을 분석하기로 한다. 우선, 프로젝션 TV의 시청 환경과 색순용 상태에 대해 고찰하기로 한다. 이는 시청자가 어떤 자극에 색순용된 상태로 색을 지각하는가에 따라서 다른 표시색으로 보이는 것이 가능하기 때문으로, 예를 들어 다음과 같은 시청 환경과 시청자의 주시 상태를 생각해 보자. 실내 조명은 CIE 표준 광원 A의 색도에 해당하는 백열등이고, 주위의 Scene은 평균적으로 Natural Gray의 색도를 갖는다. TV의 화상은 평균 휘도  $50 \text{ cd/m}^2$ , 백색의 색도는  $13000^\circ\text{K}$ 의 색온도(Correlated Color Temperature)를 갖는다. TV에 보이는 화상의 평균 색도도 Natural Gray라고 한다. TV 시청 시의 Background의 평균적인 휘도는 완전확산체의 20% 또는 TV 평균 휘도의 20%, 색도는 Natural Gray이다. TV 시청 시, 시청자가 TV만을 주시하지 않는다면, 주변의 시야 내에서 가장 밝은 White색을 갖는 확산면에 인식적인(Cognitive) 순용이 되거나, 주위의 평균적 휘도/색도에 비선택적인(Non-selective) 순용이 될 수 있다. 이 같은 순용상태로 TV를 시청하면 TV 화면이 전체적으로 푸르게(Bluish) 보일 것이다. 반면, 야간에 어두운 배경을 갖는 고휘도의 TV를 시청자가 장시간 주시하고 있는 경우는 TV 화상의 평균 휘도와 색도에 순용될 것이다. 이 때, 고개를 돌려 주위를 보면, 주위가 전체적으로 노랗게(Yellowish) 보이게 된다. 어느 정도의 조명하에서 TV, 모니터와 같은 발광체를 볼 때 일반적인 것으로 알려진 시청 조건은 불완전 색순용(Incomplete Chromatic Adaptation)으로서,<sup>[8]</sup> 순용의 기준이 되는 순용 자극(Adapting Stimulus)과 Equal Energy 자극-감각적인 기준 백색이 모두 순용에 영향을 주는 자극이다. 이를 위해서는 순용 자극을 구해야 하나, 이것 역시 전술한 바와 같이 순용 상태에 따라 다른 값을 보인다. Hunt는 순용 범위(Adapting Field)를 Background와 Surround를 포함한 시야각 내의 모든 Scene으로 정하고, 조명과 같은 색도를 갖는 순용 자극을 선정하였다.<sup>[9]</sup> Fairchild는 발광체의 주시 상태에 의해 TV나 모니터의 화상에서 백색의 색도와 휘도를 기준으로 하여 표시색을 구하였으며,<sup>[8]</sup> 그 외에도 중심부의 TV 화상과 주위 배경의 휘도/색도를 각각 구한 후, 중심부/주변부의 감도의 차이를 고려, 선형 보간에 의해 종합적인 순용 자극의 크기를 유추한 연구 사례도 보고되었다.<sup>[10]</sup> 본 논문에서는 Fairchild의 모델에 의한 RLAB 색공간을<sup>[11]</sup> 색재현 성능 분석에 이용하기로 한다.

### III. 성능 지표와 최적 설계

본 절에서는 3판식 액정 프로젝션 시스템이 구현할 수 있는 최대의 색재현 영역을 갖도록 색분리/합성 광학계의 설계 문제를 제시하고 이에 대한 해결을 보이고자 한다. 배면 Projection TV의 일반적 시청 환경은 전면형보다 상대적으로 밝으므로, 시청 환경에 따른 표시색의 영향이 크며 그에 의거하여 광학계를 최적 설계할 필요가 있다. 광학계 설계 시에는 순도(Saturation)뿐 아니라 휘도까지 고려한 채도를 개선하는 것이 타당한 방법으로, 이는 2차원 평면상의 재현색영역(Color Gamut) 대신 3차원 색공간에서의 채도량 혹은 색재현 영역을 성능 지표로 하여, 이를 최적화함으로써 인간의 시각적 특성과 일치하는 색재현 개선의 효과를 얻을 수 있다. 여기서는 표색계 모델에 의해 재현될 수 있는 표시색의 영역이 최대가 되도록 3차원적 색영역의 크기를 성능 지표로 사용한다.<sup>[12]</sup> 프로젝션 TV의 색합성은 가색합성 방법이므로, 공간상에서 재현가능한 색좌표로 구성된 영역은 Red, Green, Blue의 기본색, Cyan, Magenta, Yellow의 2차색과 백색, 원점(흑을 의미)의 색공간 좌표를 꼭지점으로 하는 다면체의 형태를 가지며, 따라서, 성능 지표는 이 같은 다면체의 부피를 구하는 함수의 형태로 나타낼 수 있다.

이상에서 보인 표색계 모델을 이용한 최적 설계 문제를 벡터 양자화 방식으로<sup>[12]</sup> 기술하면 다음과 같다. 우선, 표준조건만을 생각한 색채학적 전개를 기술한다.

가시 파장 범위를  $\lambda \in [\lambda_{min}, \lambda_{max}] = [380, 780]$ 로 하고,  $n$ 을 샘플링수, 즉 벡터의 차원이라 할 때, 광원의 분광 벡터를 다음과 같이 표기한다.

$$L_{amp} = [l_1 \dots l_n]^T \quad (1)$$

또한, 액정 모듈과 기타의 광학부는 Flat한 분광 투과 특성을 갖는다고 가정하고,  $T_{LCD}$ ,  $T_{other}$ 로 표기된 각각의 투과율을 다음의 상수로 설정한다. 이 상수들은 측정 후에 근사화한 값이다.

$$T_{LCD,R} \equiv T_{LCD,G} \equiv T_{LCD,B} \equiv 0.1, \quad T_{other} \equiv 0.8$$

그림 1에서 보인 바와 같이, 3판식 액정 프로젝션의 색분리/합성에는 6개의 Dichroic Mirror가 사용되며, 각각의 투과/반사율의 분광 벡터를 각각 다음과 같이 표기한다.

$$MSM^i = [t_i^1 \dots t_i^h]^T, \quad RFL^i = [r_i^1 \dots r_i^h]^T, \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (2)$$

이 경우, R, G, B의 기본색이 투사될 때의 분광 벡터는 해당 액정을 통과하는 빛의 광로에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{aligned} R &= L_{amp} \otimes TSM^1 \otimes TSM^2 \otimes RFL^3 \otimes RFL^6 \cdot T_{LCD,R} \cdot T_{other} \\ G &= L_{amp} \otimes TSM^1 \otimes RFL^2 \otimes RFL^5 \otimes TSM^6 \cdot T_{LCD,G} \cdot T_{other} \\ B &= L_{amp} \otimes RFL^1 \otimes RFL^4 \otimes TSM^5 \otimes TSM^6 \cdot T_{LCD,B} \cdot T_{other} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 연산자  $\otimes$ 은 벡터의 각 요소간의 곱을 나타낸다.

기본색의 분광 벡터  $R, G, B$ 와 CIE Color Matching 벡터  $\hat{x}, \hat{y}, \hat{z}$ 로부터 기본색의 3차극치 ( $X_r, Y_r, Z_r$ ), ( $X_g, Y_g, Z_g$ ), ( $X_b, Y_b, Z_b$ )를 구할 수 있으며, 다음 식은 Red 색에 대한 3차극치

의 예를 보인 것이다.

$$X_r = R^T \hat{x}, Y_r = R^T \hat{y}, Z_r = R^T \hat{z} \quad (4)$$

여기서 Color Matching 벡터는 다음과 같이 표현되며, 다음 장의 그림 6에 도시되어 있다.

$$\hat{x} = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^T, \hat{y} = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_n]^T, \hat{z} = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_n]^T \quad (5)$$

액정 Projection 시스템은 가색 시스템이므로, R, G, B 기본색의 분광 벡터와 3자극치로부터 백색 및 2차색(Secondary Colors)인 C, M, Y의 분광 벡터와 3자극치를 구할 수 있으며, 다음 식은 R, G, B 기본색의 합성인 백색의 분광 벡터와 3자극치  $X_w, Y_w, Z_w$ 를 보여준다.

$$W = R + G + B \quad (6)$$

$$X_w = X_r + X_g + X_b, Y_w = Y_r + Y_g + Y_b, Z_w = Z_r + Z_g + Z_b \quad (7)$$

이 경우, 백색의 색도 좌표 ( $x_w, y_w$ )는 다음 식으로 구해지며, Dichroic Mirror의 분광 투과/반사 특성이 바뀔 때는 백색의 색좌표도 역시 바뀌게 된다.

$$x_w = \frac{X_w}{X_w + Y_w + Z_w}, y_w = \frac{Y_w}{X_w + Y_w + Z_w} \quad (8)$$

따라서, 색재현 설계는 백색의 색도 변화를 수반하게 되며, 필요에 따라 백색의 색좌표를 정해진 기준 좌표로 재조정하여야 한다. 이것을 일반적으로 White Balancing으로 언급하며, 이 같은 White Balancing 방법은 색재현 설계시 동시에 고려할 수도 있고, 색재현 설계 후에 회로적으로 기본색의 광량에 이득을 인가함으로써 구현될 수 있다. 본 논문에서는 White Balance는 고려 않기로 한다. 다음은 기본색, 2차색과 백색이 표준 조건하에서는 어떻게 지각되는가를 보인 1976 CIELUV 균등색공간의 좌표를 구할 수 있으며, Red색에 대한 색좌표( $L_r^*, u_r^*, v_r^*$ )와 채도  $C_r^*$ 를 구하는 예가 다음식에 보인다. 여기서  $Y_n$ 과 ( $u_n', v_n'$ )은 기준 백색의 휘도와 색도- $D_{65}$ 인 경우는(0.1978, 0.4684), B인 경우는 (0.3485, 0.3517)-를 나타낸다.

$$\begin{aligned} L_r^* &= 116(Y_r/Y_n)^{1/3} - 16, \\ u_r^* &= 13L_r^* [4X_r/(X_r + 15Y_r + 3Z_r) - u_n'], \\ v_r^* &= 13L_r^* [9Y_r/(X_r + 15Y_r + 3Z_r) - v_n'], \\ C_r^* &= \sqrt{(u_r^*)^2 + (v_r^*)^2} \end{aligned} \quad (9)$$

이제까지는 표준 조건에 대한 색공간을 보인 것으로, 시청 조건이 표준 조건이 아닌 경우는 다음의 표색계 모델에 의해 표시색의 색좌표를 구할 수 있다.

표시색은 XYZ 3자극치와는 다른 Fundamental 3자극치 ( $L, M, S$ )로 나타내며, 3종류의 원추수용체(Cone)의 색지각 과정에 의해,<sup>[9]</sup> 가시광선 파장 대역 중에서 각각 장, 중, 단파장의 대역의 빛의 감각량에 해당한다. Fundamental 3자극치는 XYZ 3자극치와 순응 상태 즉, 순응 자극에 의해 구할 수 있으며, 인간의 눈에 느껴지는 표시색을 나타내는 물리량으로써 사용된다. XYZ 3자극치가 같은 빛이라도 서로 다른 시청 조건에서는 Fundamental 3자극치가 다르게 되며, 다른 표시

색을 갖는다. 반대로 XYZ 3자극치가 달라서 표준 조건에서 다르게 보이는 2개의 발광체라도, Fundamental 3자극치가 같게 되는 각각의 시청 조건에서는 서로 같은 색으로 보일 수 있다. 즉, 표시색이 같다는 것을 의미한다. 본 논문에서 사용한 표색계 모델은 3단계로 구성되어 있으며, 1단계로 XYZ 3자극치와 Fundamental 3자극치의 관계를 실험적으로 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, M = \begin{bmatrix} 0.4002 & 0.7076 & -0.0808 \\ -0.2263 & 1.1653 & 0.0457 \\ 0.0 & 0.0 & 0.9182 \end{bmatrix} \quad (10)$$

위의 관계에 의한 Fundamental 3자극치는 단순히 인간의 시각의 원추 세포의 감각량만을 나타낸 것으로, 다음 단계의 순응 현상에 의한 표시색의 변화를 적용시켜야 한다.

$$\begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix} = A_1 \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} a_L & 0 & 0 \\ 0 & a_M & 0 \\ 0 & 0 & a_S \end{bmatrix}, a_L = \frac{p_L}{L_n}$$

$$p_L = \frac{(1 + Y_n^{1/3} + I_E)}{(1 + Y_n^{1/3} + 1/I_E)}, I_E = \frac{3(L_n/102.70)}{(L_n/102.70 + M_n/98.47 + S_n/91.82)} \quad (11)$$

식(11)에서 후반 3개의 식은 L(long), M(Medium), S(Short)의 영역 중에서 L의 경우만 보인 것으로, 나머지 M과 S의 경우도, 마지막 식의 분자의  $L$ 값 대신에  $M$ 과  $S$ 값을 대치함으로써 구할 수 있다. 위의 식은 불완전 순응을 나타낸 식으로  $p_L, p_M, p_S$ 이 1인 경우가 Von Kries 순응으로 알려진 완전 순응(Complete Chromatic Adaptation)을 말하고, 각 계수는 Equal Energy 상태의 각 원추 수용체의 감각량을 나타낸다. ( $L_n, M_n, S_n$ ) 및  $Y_n$ 은 순응자극의 Fundamental 3자극치와 휘도값이다. 마지막 단계로서, 수용체 사이의 신호 간섭에 의한 표시색의 변화가 생기며, 그 영향은 휘도가 클수록 적어진다.

$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix} = C_1 \begin{bmatrix} L_1 \\ M_1 \\ S_1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & c & c \\ c & 1 & c \\ c & c & 1 \end{bmatrix}, c = 0.219 - 0.0784 \log_{10} Y_n \quad (12)$$

최종적으로 구해진 ( $L_a, M_a, S_a$ )에 의해 표시색을 나타낼 수 있으나, 이 같은 Fundamental 3자극치에 의한 색공간은 XYZ 3자극치에 의한 공간과 유사하게, 선형성과 균등성이 보장 안 되므로 색지각량을 해석하는 데는 적절치 않다. 따라서, 이미 개발된 균등색공간의 정보를 이용하여야 하며, 이를 위해 다음과 같이 표준 시청 조건의 3자극치로의 변환이 필요하다.

3자극치가  $[X_1, Y_1, Z_1]^T, [X_2, Y_2, Z_2]^T$  인 2개의 발광체가 각각 #1, #2의 시청 조건하에서 지각될 때, 표시색이 서로 같다고 하면 다음의 관계가 성립된다.

$$\begin{bmatrix} L_a \\ M_a \\ S_a \end{bmatrix} = C_1 A_1 M \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} = C_2 A_2 M \begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

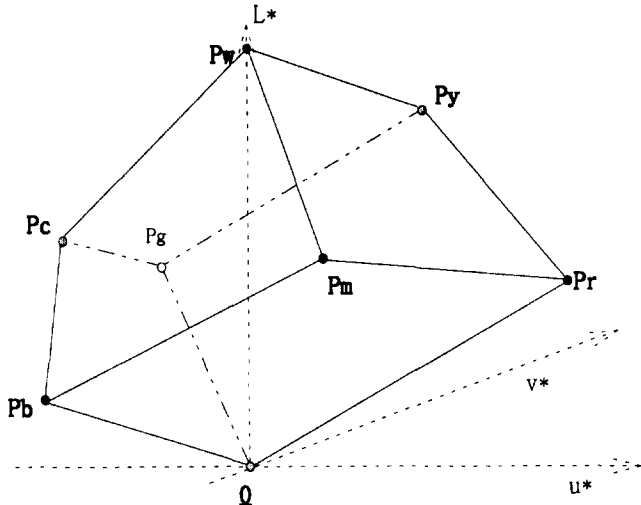


그림 5. CIELUV 색공간에서의 Projection TV의 재현 색영역.

위의 관계로부터, 시청 조건 #1의 TV로부터의 빛을 측정하여 XYZ 3자극치가  $[X_1, Y_1, Z_1]^T$ 일 때, 표준 조건하에서 여기서 시청 조건 #2로 합-같은 표시색으로 보이기 위해서 TV가 나타내야 할 XYZ 3자극치  $[X_2, Y_2, Z_2]^T$ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \\ Z_2 \end{bmatrix} = M^{-1} A_2^{-1} C_2^{-1} C_1 A_1 M \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

이상의 변환에 의해 표준 조건하에서 같은 표시색으로 보이기 위한 XYZ 3자극치를 이용하여 색재현 설계를 수행할 수 있다. 이 경우, 식(9)에 의해 CIELUV 균등색공간의 좌표를 구할 수 있으며, 표시색의 색채학적 분석이 가능해진다.

전술한 바와 같이 액정 프로젝션 시스템의 재현 가능한 색영역은 LUV공간상의 흑색, 백색, R, G, B 기본색, C, M, Y의 2차색으로 이루어진 다면체로 다음 그림과 같은 6면체로 근사화될 수 있다.<sup>[13-14]</sup>

재현색영역의 크기는 그림 5에 보인 6면체의 체적으로, 꼭지점  $P_w, P_g, P_b, P_c, P_m, P_y, P_r$ 은 각각 Red, Green, Blue의 기본색, Cyan, Magenta, Yellow의 2차색과 백색에 해당하며, 좌표는 해당색의 균등색공간의 색좌표( $u^*, v^*, L^*$ )이다. 본 논문에서 최적화하려는 성능 지수로서 위에 보인 색재현 영역의 체적의 크기를 선정하였다.

#### IV. 실험 및 결과

앞 절까지 기술한 최적화 설계 방법에 의해 자사에서 개발 중인 액정 프로젝션 시스템을 대상으로 설계를 시도하였다. 우선 다음 그림에서, 사용된 광원의 분광 특성의 측정 결과를 보인다.

Dichroic Mirror의 색재현 설계 시, 성능 지수를 최대로 하는 구체적인 설계 변수로서, 아래의 그림과 같이 Dichroic

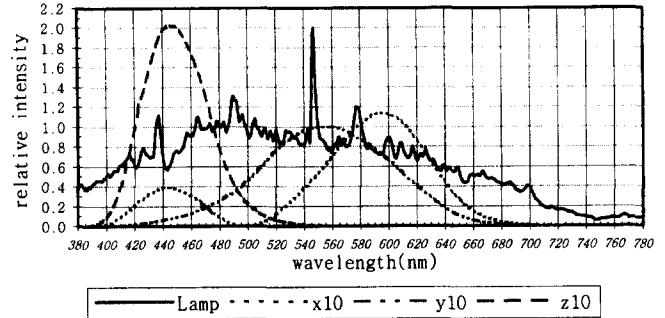


그림 6. Lamp의 발광 특성과 CIEXYZ Matching Functions.

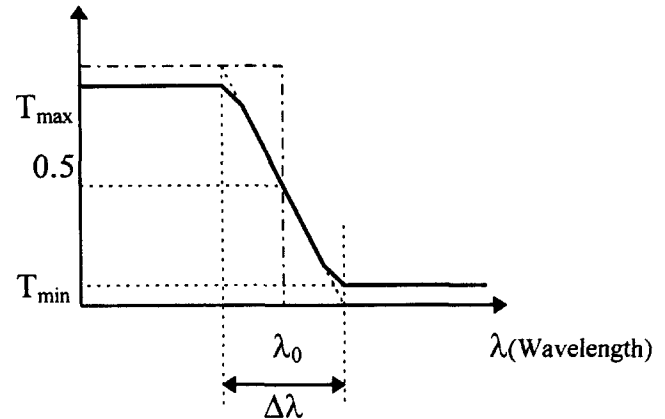


그림 7. 간략화된 Dichroic Mirror/Filter의 설계 예.

Mirror의 분광 투과 특성을 선형 근사화 시키고, 그 경계 파장  $\lambda_0$ 를 구하는 문제를 제시하고, 이를 해결하였다. 그림 7에서 그 외의 가능한 설계 변수는 비용과 제조 기술 관계로 다음과 같이 고정값을 적용하였다.

$$\Delta\lambda = 40, T_{\max} = 0.95, T_{\min} = 0.01$$

그림 1에 보인 바와 같이 액정 Projection 시스템에는 총 6개의 Dichroic Mirror가 있으며, 그 중에서  $M_1$ 과  $M_5$ 는 경계 파장  $\lambda_1$ ,  $M_2$ 과  $M_6$ 는 경계 파장  $\lambda_2$ 의 특성치를 갖는다고 하였다.  $M_3$ 과  $M_4$ 는 전반사의 특성을 갖는다. 따라서, 주어진 설계 문제는 색재현 영역의 크기를 최대로 하는 경계 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 를 구하는 것이다.

본 논문에서 다루고 있는 문제는 매우 복잡한 비선형 관계로 해석적 최적화는 불가능하며, Newton 방법 등 수치적으로 설계 변수를 구할 수 있다. 우선 경계 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 의 변화에 따른 성능 지수의 변화를 그림으로 보인다. 경계 파장  $\lambda_1$ 과  $\lambda_2$ 를 각각 455~505 nm, 555~605 nm의 범위로 변화시킬 때 시청 조건에 따른 표시색의 재현색영역의 크기가 유일한 극대값이 존재함을 알 수 있다.

그림 8은 표준 시청 조건을 가정한 성능 지수, 즉 CIELAB 공간에서의 재현 색영역의 변화를 보인 것으로, 여기서 기준 백색의 휘도는 경계 파장의 변화 범위 내에서 TV의 백색의 가장 높은 값으로, 색도는 B로 하였다. 그림 9는 색순응을 고려한 표색계인 RLAB 공간에서의 표시색의 색영역 크기로, 이때의 순응 자극은 휘도는 그림 8의 예와 같은 값으로, 기준

Variation of Color Gamut in CIELAB (B)

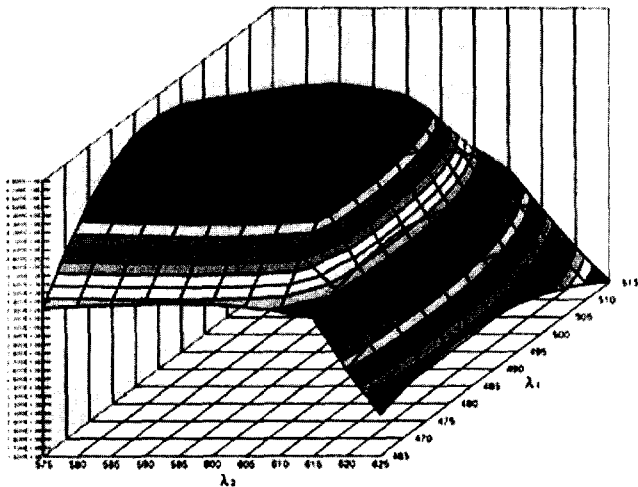


그림 8. 경계 파장의 변화에 따른 성능지수의 변화(B 기준 백색의 CIELAB 적용).

Variation of Color Gamut in RLAB (B)

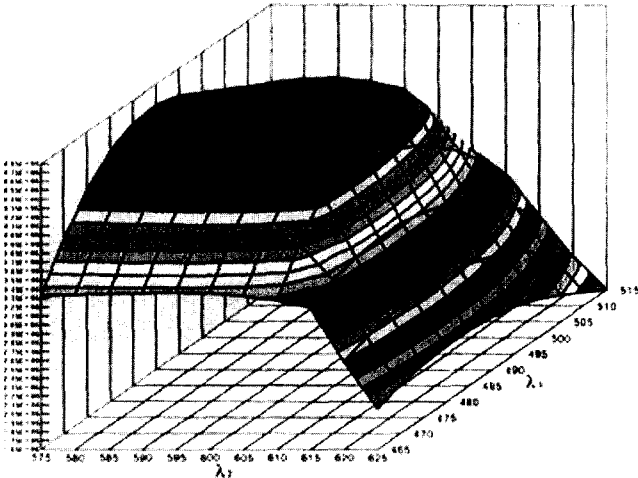


그림 9. 경계 파장의 변화에 따른 성능지수의 변화(순응자극 B의 RLAB 적용).

표 1. 적용 색공간에 대한 경계 파장의 최적 설계치

색공간	$\lambda_1$ (nm)	$\lambda_2$ (nm)
CIELAB	490	599
RLAB	492	597

백색의 색도 좌표는 CIE의 표준 B광원과 같은 (0.3485, 0.3517)로 하였다. 또한 균등색공간 적용 시의 기준백색은 표준 조건  $D_{65}$ 이다. 각각의 경우에 대해, 색재현 영역의 크기를 최대화 하는 경계 파장을 구해보면 표 1의 결과와 같다. 표에 보인 바와 같이, 재현 색영역의 성능 지수에 대해서는, 표준 조건이 아닌 시청 조건일 때 표색계에 의한 설계치의 변화가 예상보다 크지 않음을 알 수 있었다. 이는 표색계 모델에서도 완전 순응의 조건 하에서는 주위의 배경의 색도보다는 순응 자극에 주로 영향을 받으므로, 표색계의 RLAB 모델도 완전

순응에서 순응 자극이 같은 CIELAB모델과 유사한 결과를 보임을 알 수 있었다. 표준 조건이 아닌 여러 시청 조건에 대해서도 같은 방법으로 최적 설계를 수행할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 인간의 시각 특성과 시청 조건을 고려한 최적의 색재현 특성을 분석하고, 액정 프로젝션 TV에 사용되는 광학계에 대해 재현 색영역을 최대화하는 것을 목적으로, 프로젝션 TV 시스템의 구성과 인간의 색지각 특성을 기술한 후, 배면형 3판식 액정 프로젝션 TV를 대상으로 색분리/합성 광학계의 최적화 문제 및 설계 방법의 제시, 실험 결과를 설명하였다. 또한 이를 위해 성능 지수와 기준 백색의 선정에 대해서 언급하였다. 결과로서, 가장 일반적 시청 환경하에서 인간이 시각적으로 느끼는 채도를 최대로 만드는 Dichroic Mirror의 설계 변수인 경계 파장의 최적치를 구하였다. 이는 현 Set의 직관적 설계 방법의 문제점을 개선한 체계적인 최적 설계 방법으로서, 현재 출시하고 있는 제품에 직접 적용이 가능하다.

본 논문에서 제안된 설계 방법은 CRT 투사형 TV, 직시형 칼라 브라운관의 형광 물질의 개선과 직시형 액정 Display 장치의 Color Filter 설계 시의 기반 기술로서 그 효과가 기대되며, 지속적인 연구, 개발을 수행할 것이다. 나아가서, 시청자의 기분에 따라 색이 자동 조절되는 TV와 같이, 인간의 심리, 감각, 사고 및 행동에 관한 Soft Science를 통해 인간을 위한 자연스럽게 쾌적한 제품이 부각될 것이며, 이를 위한 지속적 연구가 필요하다.

### 참고문헌

- [1] Jee-Hong Kim, "Colorimetric Filter Design for Projection TV Systems", SID Digest, Int'l Symposium, San Diego, 1996.
- [2] H. Yasto, *The Design of Projection TV*, White Series No. 107, Triceps, Tokyo, (1990).
- [3] H. Stupp, *et al.*, SID Digest, Int'l Symposium, (1993).
- [4] W. Ma, *et al.*, Proc. SPIE **1815**, 81 (1992).
- [5] H. Pritchard, IEEE Tr. CE, **CE-23**, 467 (1977).
- [6] W.G. Hunt, *The Reproduction of Colour*, 4th edition, Fountain Express, England, (1987).
- [7] G. Wyszecki, W. Stiles, *Color Science*, 2nd edition, Wiley, New York, (1982).
- [8] M. Fairchild, TAGA Proceeding, **2**, 803 (1992).
- [9] W.G. Hunt, Color Res. App., **16** 146 (1991).
- [10] 기준 백색 설정 및 칼러 영상 품질 개선, 연구결과보고서, LG전자, (1996).
- [11] M. Fairchild, R. Berns, Color Res. App., **18** 178 (1993).
- [12] Jee-Hong Kim and H.B. Lee, Proc. SPIE **3140**, 178 (1997).
- [13] W. Meyer, *et al.*, Proc. Color Imaging Conf., IS&T, pp. 197-201, (1993).
- [14] PJTV의 색재현성 개선, 연구보고서, LG전자, (1996).

## Color reproduction using color appearance model in LCD projection systems

Jee-Hong Kim

*Multiware & Image Co., Ltd., Seoul, Korea*

(Received March 4, 1998, Revised manuscript received December 1, 1998)

A new method is proposed for the design of the dichroic mirrors in 3-LCD projection systems for color separation/composition. Rather than simply basing the color performance criterion on luminance or chromatic saturation only, the optimum design parameters can be found by maximizing the volume of the perceived color gamut in a 3-D uniform color space under various viewing conditions. We proposed an effective method using 3-dimensional color gamut in RLAB color space and related color appearance model and used the linearly approximated spectrum of dichroic mirrors for simplicity and vector space description. By this method, we found optimal half-power wavelengths in dichroic mirrors which maximized our performance criterion.