

# RGB 레이저 디스플레이의 광역 컬러 재현 방법

신윤철, 김일도, 이상진, 김문철  
 삼성전자 DM 연구소 A/V Solution Team. Video Lab.

## Wide Color Gamut Reproduction Methods for RGB Laser Display

Yoon-Cheol Shin, Il-Do Kim, Sang-Jin Lee, Moon-Cheol Kim  
 Video Lab., A/V Solution Team., Digital Media R&D Center, Samsung Electronics Co. Ltd.  
 E-mail : yc73.shin@samsung.com

### Abstract

색 재현 범위(Color Gamut)가 기존의 표준신호(예 sRGB, Rec. 709)대비 상이한 Laser 디스플레이 장치에서 Gamut Matching Algorithm 을 이용하여 표준 컬러의 재현을 가능하게 하고, CRT 대비 광범위한 Laser Color Gamut 의 모든 색 영역을 표현 할 수 있다. 이 방법은 일정한 휘도 및 hue 에서 표준입력과 출력장치의 색 재현 범위에 따라 주어진 입력신호의 Chroma 를 높이거나, 줄임으로써 출력장치의 전 색 재현 범위를 사용할 수 있게 된다.

### I. 서론

현재 방송 등 display 장치에 사용되는 CRT 표준신호 범위는 인간이 감지 할 수 있는 범위의 약 35% 정도를 사용하고 있다[1]. 그러므로 각 디스플레이 장치에서 표현 불가능한 색들은 Gamut 경계에 클리핑 되거나 알고리즘에 따라 mapping 된다. 일반적으로 color 신호들을 균일한 컬러공간(CIELAB, CIELUV)등의 좌표로 변환하여 그 해당 컬러 공간상에서 복잡한 Gamut Boundary Detection Algorithm[2]을 이용 Mapping 하는 방식으로 많은 계산량이 요구되어 실시간 응용에는 적합하지 못하다. 이를 실시간 처리에 응용하고자 LUT method[2]가 이용되기도 하지만 그를 위해선 많은 메모리가 요구되

며 해당 장치의 Colorimetric 특성에 영향을 주는 Device Setting 이 변할 때 마다 LUT Data 를 재차 계산해주어야 하는 단점이 있다. Laser 컬러 디스플레이에서 장치 독립적인 컬러 신호를 Gamut Matching Algorithm 에 의거 Signal Mapping 으로 표준컬러의 재현을 가능하게 하고, CRT 대비 광범위한 Laser Color Gamut 의 모든 색 영역을 표현 할 수 있다. 본 논문의 알고리즘은 Look-Up Table 을 사용하지 않으면서도 실시간 연산에 적합하게 설계되어 여러 가지 디스플레이 장치에 적용 할 수 있다. 실험은 JENOPTIK™ RGB 레이저[3], 광섬유, 3관벨 DLP 프로젝터로 구성된 시네마 프로젝터에 적용하여 색 재현 범위 확장을 통한 표준 컬러의 재현과, 광역 컬러를 구현하였다.

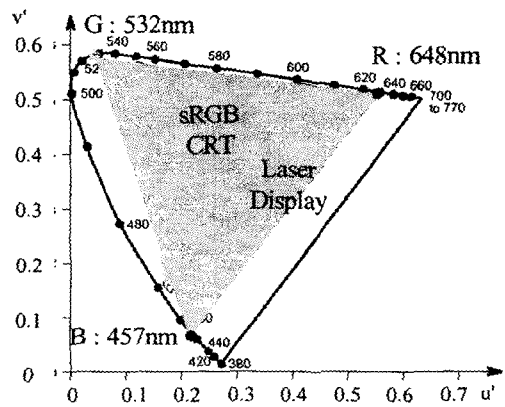


그림 1 CRT & Laser Color Gamut

## II. Gamut Matching Algorithm

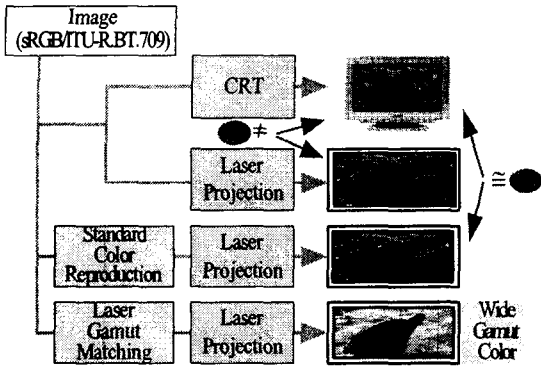


그림 2 Gamut Matching System

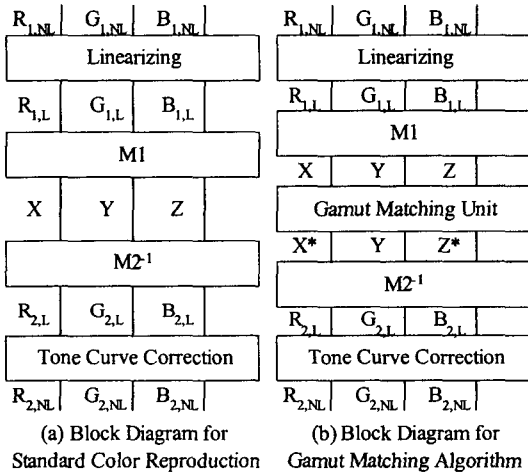


그림 3 Block Diagram

### 2.1 Standard Color Reproduction

Laser 디스플레이에서 표준신호의 재현 시, 그림 2와 같이 실제와는 다른 색감을 볼 수 있다. 표준신호의 재현에서 그림 3의 (a)와 같이 입력신호를 장치독립적인 XYZ 공간으로 좌표변환 하고, RGB laser의 각 Primary 색 좌표와 White Point 설정에 따른 colorimetric Inverse Model 을 통해 Laser 디스플레이의 입력신호로 변환되어 표준신호가 재현된다. 이 경우 디스플레이상에 표현될 색의 범주는 해당 표준 규격내의 표현 가능한 신호만 가능하다. 식 1은 표준신호의 재현에 사용되는 3x3 변환 매트릭스 이다.

$M1$  : sRGB to XYZ conversion 매트릭스

$M2^{-1}$  : LaserRGB<sub>L</sub> to XYZ conversion inverse 매트릭스

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M1 \begin{pmatrix} R_{1,L} \\ G_{1,L} \\ B_{1,L} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} R_{2,L} \\ G_{2,L} \\ B_{2,L} \end{pmatrix} = M2^{-1} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (1)$$

### 2.1 Gamut Matching

표준컬러 재현의 경우에 표현 불가능한 색들은 특별한 대책이 없는 경우 Gamut 경계에 클리핑 되는 것이 일반적이며, 반대로 디스플레이 상에서는 표현이 가능하나 해당 표준신호에 그 색신호가 정의 되어있지 않은 경우는 그 영역을 사용하지 않게 된다. 그림 3의 (b)와 같은 Gamut Matching Algorithm으로 위와 같은 문제점들을 해결할 수 있다.

Gamut matching unit 은 먼저 기존의 CIE-XYZ 컬러 공간을 선형변환 하여 그 기저 컬러공간인 WYV로 변환한다. 일반적으로 Gamut Matching 을 XYZ 공간상에서 할 경우 휘도 축이 세 X, Y, Z 직교 좌표계에 관한 함수로 나타나서 그 복잡도가 증대한다. 따라서 그림 4의 (b)와 같이 그 휘도 축을 단지 한 축인 Y 값에만 Dependent 한 좌표계로 선형변환 하게 되면 신호 처리 면에서 그 복잡성을 대폭 줄일 수 있다.

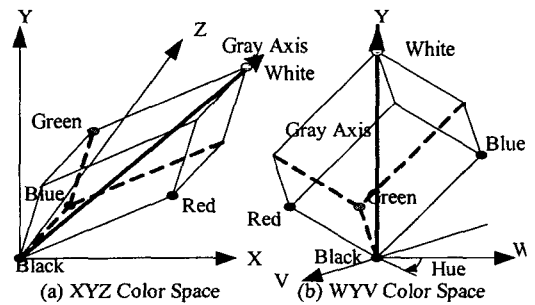


그림 4 컬러공간

이 변환에 사용하는 3x3 매트릭스 는 식 (2)과 같이 WYV 컬러공간이 기존의 TV 방송 신호 규격인 YCbCr 신호 규격과 유사한 구조를 갖도록 구성한다.

$$XYZtoWYV = \begin{pmatrix} -0.5401 & -0.18664 & 0.64275 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1.82307 & -1.47802 & -0.2339 \end{pmatrix} \quad (2)$$

식 (2)의 매트릭스는 변환 매트릭스의 한 예로 조건에 따라 여러 가지가 있을 수 있다. 본 논문에서는 white point 를 일치시키고, blue 단색이 W 축 상에 위치 하도록 한다. 결국 WYV 컬러공간은 XYZ 컬러공간의 Gray 축이 WYV 의 Y 축 상으로 투영 됨으로써 이 축

을 중심으로 법선 Vector 의 방사선 방향으로 크기를 Chroma 라 하며, 그 방향을 Hue 라고 정의 한다.

$$\text{Chroma} : C = \sqrt{W^2 + V^2}, \quad \text{Hue} : H = \text{Arctan}\left(\frac{V}{W}\right) \quad (3)$$

그림 5 는 입력 표준 신호의 color gamut 과 디스플레이의 color gamut 을 WYV 컬러공간 상에서 휘도가 일정한 평면을 보여준 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 디스플레이의 Color Gamut 이 입력 표준 신호 Gamut 과 일치 하지 않기 때문에 기존의 방법으로는 전 영역을 사용하지 못하게 된다. 따라서 입력 신호의 Luminance(Y) 및 Hue(h)를 유지하면서 주어진 입력 color 신호의 Chroma 를 신장(s1→s2) 하거나 축소(c1→c2) 함으로써 대상 디스플레이의 전 Color Gamut 을 사용할 수 있게 된다.

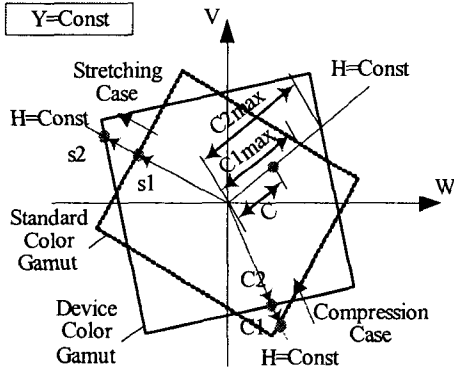


그림 5 Color Stretching / Compressing

이를 위해서는 주어진 입력 color 신호에 대해 신장/축소를 하기 위해 얼마만큼 scaling factor(K)를 가할 것 인지를 알아야 한다. Scaling Factor K 를 계산하는 방법은 각각의 표준 신호 Gamut 과 디스플레이 Gamut 에 있어서 주어진 입력 신호에 대해 Y=const, Hue=const 조건을 만족하면서 최대 표준신호 Gamut 에 대한 scaling factor K1 및 디스플레이 Gamut 에 대한 K2 를 구해 그의 비를 구함으로써 원하는 scale 상수 K(W,Y,V)를 구하게 된다. 따라서 주어진 표준 색 신호 Y 및 H=constant 조건을 만족하는 모든 색상(C=0~C1max)의 Gamut Scaling Factor 는 C2max/C1max 이고 K1 과 K2 의 비로 표현된 다.

$$K1(W, Y, V) = \frac{K2(W, Y, V)}{K1(W, Y, V)} = \frac{C_{2max}/C}{C_{1max}/C} = \frac{C_{2max}}{C_{1max}} \quad (4)$$

K1 및 K2 를 구하는 방법은 WYV 의 선형변환 컬러공간 인 linear RGB space 로 변환 하여 그 RGB 신호

의 고정된 최소/최대값을 이용하여 구한다. WYV 와 RGB<sub>1,L</sub> 과 RGB<sub>2,L</sub> 신호간에는 선형변환의 관계를 갖고 있다. 이때의 각 매트릭스 계수들은 신호 규격 (NTSC/PAL/sRGB 등)에 따라 각각 다른 값들을 갖는다. 이 관계식으로부터 주어진 화소가 WYV 로 주어 졌다면 이를 RGB color 신호로 변환 할 경우 휘도 신호(Y)에 의한 initial 고정 성분과(Rinit, Ginit, Binit) color 신호인 W, V 성분에 의한 변경 성분(ΔR, ΔG, ΔB)으로 분리 가능하다.

$$\begin{aligned} R &= R_{init} + \Delta R \\ G &= G_{init} + \Delta G \\ B &= B_{init} + \Delta B \end{aligned} \quad (5)$$

만약 주어진 color 신호의 채도를 Y=const, hue=const 조건을 만족하면서 factor k 만큼 증감 시킨다면 식 (6) 과 같이 표현 할 수 있다. 또한, 변환된 채도 신호를 RGB 공간으로 변경하면 (ΔR, ΔG, ΔB)만 factor k 만큼 변경됨을 알 수 있다.

$$\begin{pmatrix} Y \\ W^* \\ V^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ k \cdot W \\ k \cdot V \end{pmatrix} \text{ or } \begin{pmatrix} Y \\ C^* \\ H \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ k \cdot C \\ H \end{pmatrix}, \quad \begin{aligned} R^* &= R_{init} + k_R \cdot \Delta R \\ G^* &= G_{init} + k_G \cdot \Delta G \\ B^* &= B_{init} + k_B \cdot \Delta B \end{aligned} \quad (6)$$

구하고자 하는 Gamut 경계에서의 최대 채도를 Cmax=kmin\*C 이라 표현하면 위 수식의 k=kmin 일 때 RGB 컬러공간의 cubic 에서 그 표면에 해당하는 값이다. 따라서 변환된 R\*, G\*, B\* 값들의 신호 범위는 세 component 중 최소 하나 이상의 component 는 RGB 신호의 경계 값인 0 이나 1(8Bit 표현일 경우 0/255)을 갖는다. 이 경계치 조건을 이용하여 kmin 를 구하기 위해 kR, kG, kB 에 대해 풀어 쓰면 식 (7)과 같다. 이때 중요한 경계치 조건이 각 component 의 극대/극소치 R\*, G\*, B\*가 0 을 갖느냐 1(255)를 갖느냐 하는 문제는 각 component 들의 변경성분의 부호에 따라 결정되고 식 (8)과 같다.

$$k_R = \frac{R^* - R_{init}}{\Delta R}, \quad k_G = \frac{G^* - G_{init}}{\Delta G}, \quad k_B = \frac{B^* - B_{init}}{\Delta B} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{if } (\Delta R > 0) \quad R^* &= 1; \quad \text{else } R^* = 0; \\ \text{if } (\Delta G > 0) \quad G^* &= 1; \quad \text{else } G^* = 0; \\ \text{if } (\Delta B > 0) \quad B^* &= 1; \quad \text{else } B^* = 0; \end{aligned} \quad (8)$$

위와 같은 방법으로 각각의 kR, kG, kB 를 구한 뒤 제일 작은 값을 취하게 되면 원하는 Kmin 를 계산할 수 있다. 이 Kmin 에 의해 채도 상승된 신호(W\*, Y, V\*)는 주어진 입력 color 신호(W, Y, V)가 constant hue 및 luminance 에서 가질 수 있는 최대 채도의 color 이고,

이는 각 표준 신호규격 및 장치의 컬러공간에서 경계에 위치하는 최대 채도의 색상이 되게 된다.

$$k_{\min} = \text{Minimum}[k_R, k_G, k_B] \quad (9)$$

즉, 식 (9)을 통해 각 color gamut(sRGB, LaserRGB) 별로  $K1(K_{\text{CRT}})$  및  $K2(K_{\text{Laser}})$ 를 구하고, 식 (10)과 같이  $K1$  과  $K2$  의 비가 최종적으로 현재 표준신호의 color 를 Target Device 의 color 로 변환하는 Gamut Matching 에 사용될 Scaling factor  $K$  가 된다. 이렇게 구한 scaling factor  $K$  는 색신호인  $W, V$  신호에 가해져 신장 및 축소가 이루어진다.

$$\begin{pmatrix} Y \\ W^* \\ V^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y \\ K_{\text{scale factor}} \cdot W \\ K_{\text{scale factor}} \cdot V \end{pmatrix}, K_{\text{scale factor}} = \frac{K2}{K1} = \frac{K_{\text{Laser}}}{K_{\text{CRT}}} \quad (10)$$

### III. 실험 및 결과

실험에서는 두 가지의 입력 신호를 이용한다. 색 재현범위가 제한된 일반 표준 TV 신호와 같은 RGB image(avi) 와 색 재현범위가 제한되지 않은 전체 color 를 모두 표현하는 CIE-La\*b\* image(tif) 를 이용한다. pc 상에서 프로세싱을 거친 후 white reference 를 일치시킨 CRT 모니터와 laser 프로젝터에 표시한다. 그림 6 은 WYV 컬러공간에서 Hue 에 따른 scale factor 를 표시한 것이다. Hue, Chroma 에 상관없이 일정한 패턴을 유지함을 알 수 있다.

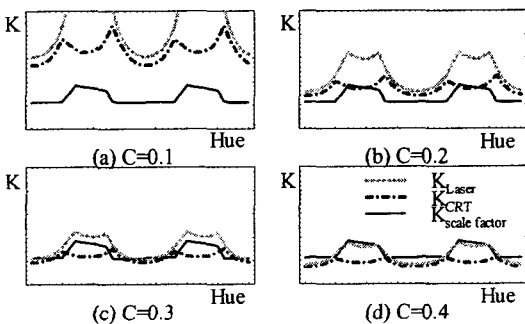


그림 6 Simulation Result I (Y=0.5)

그림 7 은 Multi-spectral Camera[4]로 촬영된 제한되지 않은 색 재현영역을 가진 CIE-La\*b\* tif 영상의 그림이다. 이 영상은 모든 color 영역을 표시 할 수 있지만 디스플레이 장치에 따라 gamut 의 제한으로 각각의 장치에서 표현 할 수 있는 범위 이외의 color 는 0, 255(RGB 기준)에서 제한되어 나타난다. 그러므로 gamut

범위 외의 color 는 본래의 색과 일치하지 않을 수 있고, 각 디스플레이에서 각각 다르게 보여진다. 색 재현영역을 벗어나는 부분을 표시한 흰색을 비교하면 (b)보다 (c)의 색 재현영역이 넓다는 것을 볼 수 있다.

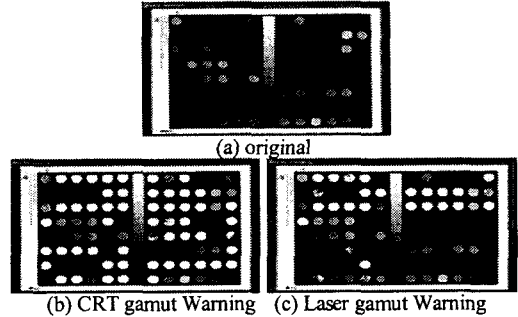


그림 7 Simulation Result II

### IV. 결론

본 논문의 Gamut matching algorithm 은 기존 표준 신호 영역을 일반 컬러 장치에 재현하는 경우에 대상장치의 표준컬러 Gamut 대비 상이한 컬러 Gamut 의 색 재현의 일치를 위한 방법이다. 입력 컬러 신호가 정하는 색상을 그대로 재현 가능케 하거나, 디스플레이의 전 gamut 영역을 사용하기 위해 같은 색상(Hue)내에서 신장 및 축소를 가하는 Gamut Matching 을 통하여 디스플레이의 모든 color gamut 영역의 사용이 가능하다. 실시간 처리에 적합하게 설계되어 ASIC 구현 시 상대적으로 Hardware Size 도 작고 여러 디스플레이 장치에 응용이 가능하다. sRGB 보다 상대적으로 color gamut 이 넓은 Laser 프로젝터에 적용하여 그 성능을 확인하였으며, 향후 wide gamut 을 지향하는 MPD (Multi Primary Display)의 유용성을 보여 준다.

### 참고문헌

- [1] 김일도, 이상진, 신윤철, 김문철, "Color Gamut Analysis of Various Display based on Human Perception" 전자공학회 하계학술대회, 2003
- [2] P. Green, L. MacDonald, "Color Engineering," Wiley-SID Series in Display Technology
- [3] Guenter Hollemann et al, "RGB lasers for laser projection displays," www.jjenoptik-los.de
- [4] www.color-aixperts.de