

# 인간의 시각 특성에 기반한 Display 색역 분석

김일도, 이상진, 신윤철, 김문철

삼성전자 DM 연구소 A/V Solution Team Video Lab

전화 : 031-200-8220 / 핸드폰 : 011-9776-2380

## Color Gamut Analysis of Various Displays based on Human Perception

Il-Do Kim, Sang-Jin Lee, Yoon-Cheol Shin, Moon-Cheol Kim

Samsung Electronic DM R&D Center A/V Solution Team Video Lab

E-mail : [ildo.kim@samsung.com](mailto:ildo.kim@samsung.com)

### Abstract

본 논문은 인간의 Perception을 기준으로 인간이 구분할 수 있는 다양한 Display들의 Color Gamut 체적들을 정량적으로 평가하는 방법을 제안하였다. 기존의 Color Gamut의 크기를 구하는 방법은 CIE-u'v' 좌표계에서 R, G, B Primaries의 좌표에 해당하는 꼭지점으로 이루어진 삼각형의 넓이를 구함으로써 표현할 수 있는 Color의 개수를 구하였다. 그러나 이 방법은 CIE-UCS Chart 자체가 2 Dimension이고, Non-Uniform Color Space이므로 정확하게 구했다고 할 수 없다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 Uniform Color Space 인 CIE-L\*a\*b\* 좌표계에서 3 차원 공간에서 Color의 개수를 구함으로써, 구분할 수 있는 Color Gamut의 체적을 인간의 Perception을 기준으로 평가하는 정량적인 기법에 대해 논하였고, 이를 4종류의 다양한 Display Type들에 적용, 그 결과를 비교하였다.

### I. 서론

기술이 발전하면서 다양한 Display 장치들이 개발되고 있다. 그러나 일관되지 않은 기준으로 Display가 재현 가능한 색 범위들을 평가하고 있어, 실제로 재현 가능한 색 범위를 표현하는데 있어서 많은 혼돈이 뒤따르고

있다.

기존의 Color Gamut의 크기를 구하는 방법은 그림 1에 서처럼, CIE-u'v' 좌표 계에서 R, G, B Primaries의 좌표에 해당하는 꼭지점으로 이루어진 삼각형의 넓이를 구함으로써 표현할 수 있는 Color의 Gamut을 평가하였다. 그러나 이 방법은 CIE-UCS Chart 자체가 2 Dimension 이고, Non-Uniform Color Space이므로 정확하게 구했다고 할 수 없다.

본 논문에서는 인간의 Color Perception[3]을 기준으로 만들어진 Uniform Color Space(CIE-L\*a\*b\*)[4][5]에서 인간이 구분할 수 있는 최대의 Color 개수를 본 논문에서 제안하는 방법으로 측정함으로써 Display 들의 Color Gamut 성능을 비교 분석 하였다. 그림 2는 본 논문에서 평가하고자 하는 CIE-L\*a\*b\* Color Space에서의 sRGB Color Gamut으로써, sRGB Color[2]의 R, G, B를 각각 10단계로 나누고, 그들의 모든 조합으로 재현 가능한 색들을 CIE-L\*a\*b\* 공간에서 3 Dimension으로 표현한 Color Gamut이다.

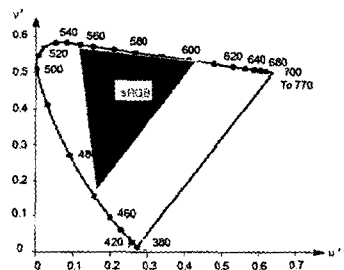


그림 1. CIE-u'v' 좌표계에서 sRGB Gamut

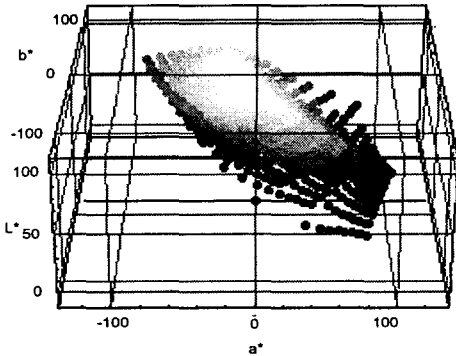


그림 2. CIE-L\*a\*b\* 좌표계에서 sRGB Gamut

## II. Color Gamut Analysis

Photopic Vision에 적용된 2° Standard Observer는 Uniform Color Space (CIE-L\*a\*b\*)에서 두 Color들의 색차 (E)가 1 이상일 때 그 두 Color들을 구분할 수 있다. 즉, L\*a\*b\*좌표 계의 두 Color C1=(L\*1, a\*1, b\*1), C2=(L\*2, a\*2, b\*2)가 있을 때, C\*=(C\*1 - C\*2)이고,

$E = (L^{*2} + a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ 가 1이상일 때, 인간은 두 Color를 구분할 수 있다. 그러므로 Display 각각의 R, G, B Primary Color들의 모든 Additive Mixture에 의해 구성된 Color Gamut을 CIE-L\*a\*b\* Uniform Color Space로 Transform한 후, 각각의 Color Space를 단위 Cubic, 즉 가로, 세로, 높이가 각각 E=1인 정육면체, 혹은 직경이 E=1인 구를 채워 그 개수를 측정 함으로써, 인간이 구별할 수 있는 최대의 Color 개수를 계산할 수 있다.

본 논문에서는 계산을 용이하게 하기 위해 Rectangle Coordinate System인 CIE-L\*a\*b\*를 Polar Coordinate System인 L\*C\*H\* 영역으로,  $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$ ,  $H = \text{Arctan}(b^*/a^*)$ 로 좌표 변환한 후 계산하였다.

그림 3은 L\*C\*H\* Color Space에서, 각각의 Lightness L\*(0에서 100까지)과 Hue H\*(0°에서 359°까지)가 변할 때 표현 가능한 최대의 Chroma C\*max를 구하는 Algorithm의 Flow Chart이다. 우선 Gamut Volume을 계산하기 위해서는 해당 Display가 갖는 Gamut Boundary를 CIE-L\*a\*b\* Color Space에서 알아야 한다. 즉, 주어진 L\*, H\*에 대해 Gamut Boundary에서의 최대의 Chroma C\*max를 구해야

한다.

구하는 방법은 주어진 L\*, H\*로부터 C\*는 0에서부터 1씩 증가 시키면서, L\*C\*H\*값을 우선 L\*a\*b\*로 변환한 뒤( ), 주어진 Display의 White Point를 고려하여 XYZ Color Space로 변환한다( ). 변환된 XYZ Color Value는 Display Colorimetric Model을 통해 Linear RGB신호로 변경하고( ), 그 RGB 신호의 Constraint 조건 판독 부에 의해 Gamut 경계인지 아닌지를 판단한다( ). 그 조건을 충족시키지 못한 경우의 C\*가 찾고자 하는 C\*max+1이므로 원하는 C\*max=C\*-1로 찾을 수 있다( ). 이 과정이 모든 Hue 및 Lightness Level에 걸쳐 이뤄지면 원하는 Display에 대한 Gamut Boundary Detection이 완료된다.

그림 3에서 구한 Maximum C\* Level을 식1에서와 같이 L\*이 Constant일 때 인간이 구별할 수 있는 모든 Color 개수를 구한다. 즉, Color의 개수는 L\*이 Constant 일 때의 Gamut내에 넣을 수 있는 정사각형 (L\*a\*b\* Color Space의 좌표축 a\*, b\*를 각각 가로와 세로로 사용하여 가로와 세로의 길이가 각각 1인 정사각형)의 개수를 구함으로써 계산하였다. 이는 L\*이 Constant일 때 그림 4와 같은 L\*a\*b\* 좌표 계의 Gamut 넓이를 구하는 것과 같은 의미이므로 Gamut을 1°씩 분할 하여 호의 넓이를 구하고, 1°씩 분할된 호 360개를 모두 더함으로써 계산할 수 있다. 이와 같은 방법으로 모든 Lightness Level (L\* = 0 ~ 100)을 1 Step (ΔL\*=1)씩 변화 시키면서 모두 더하면 L\*a\*b\* Color Space 에서 인간이 구별할 수 있는 최대의 Color 개수를 식1과 같이 구할 수 있다.

$$\sum_{L=0}^{100} \sum_{H=0}^{359} \frac{\pi \times C^* \max(L^*, H^*)^2}{360} \quad \text{식 1}$$

그림 4는 Simulation의 한 예로 L\*=50일 때 H\*가 36° 변할 때마다 C\*max를 표현한 Gamut Boundary Graph이다. 이 Graph를 ΔH\*를 0에 가깝게 무한히 작게 해서 구하면 Hue Quantization Error를 배제한 이상적인 Gamut 경계를 구할 수 있다.

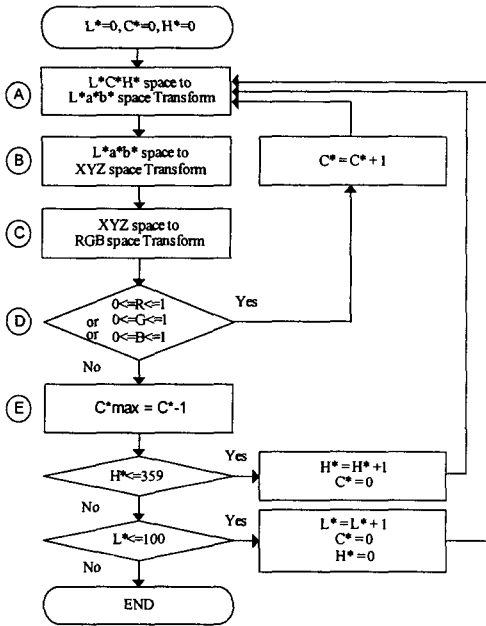


그림 3. Flow Chart

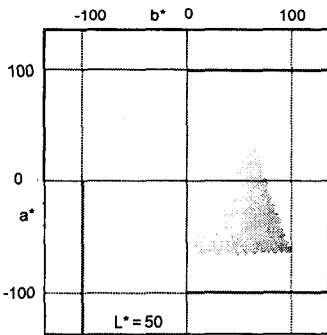


그림 4.  $L^*=50$ 일 때  $a^*b^*$  Gamut Boundary

### III. 실험 및 고찰

2차원 CIE-UCS나 CIE-xy 좌표 계에서 R, G, B Primaries의 좌표에 해당하는 꼭지점으로 구성된 삼각형의 넓이를 구함으로써 Color Gamut을 측정하는 기존 방법과 Uniform Color Space CIE- $L^*a^*b^*$ 에서 3 차원으로 Color Gamut을 측정하는 본 논문에서 제시한 방법을 비교하였다. 비교 대상으로는 기존의 CRT Display(sRGB), Samsung DLP Display(SVP-61L2HX), MPD(Multi Primary Display), Laser Display (R:628nm, G:532nm, B:446nm)의

Color Gamut들을 측정하였다.

그림 5는 CIE-UCS Chart에서 CRT(sRGB), DLP, MPD, Laser Color Space를 R, G, B Primaries의 좌표에 해당하는 세 꼭지점에 의한 Color Gamut을 한 예로 도시한 것이다. R, G, B Primaries의 좌표에 의한 삼각형의 넓이를 구함으로써 Color Gamut을 측정해 보면, 표1의 기존 방법에서와 같이 인간이 구별할 수 있는 Optimal Color Space[1][6] 에서 최대 Color 개수인 3.24 Million Color 대비 CRT Display(sRGB)의 경우 33.19%인 1.075 Million Color, DLP Display의 경우 35.09%인 1.137 Million Color, MPD의 경우 58.91%인 1.908 Million Color, Laser Display의 경우 65.42%인 2.119 Million Color가 산출 되었다.

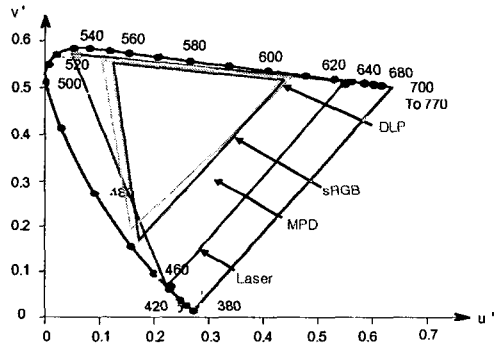


그림 5. CIE- $u'v'$  좌표계에서 각 Display들의 Gamut

그림 6 CRT(sRGB), Laser Color를 CIE- $L^*a^*b^*$  Color Space에서 표현한 Color Gamut이다.

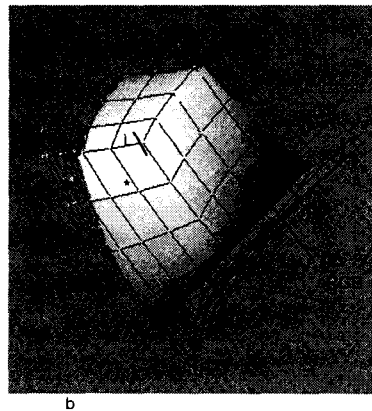


그림 6 CIE- $L^*a^*b^*$  좌표계의 CRT(sRGB), Laser Gamut

본 논문에서 제시한 방법으로 측정한 결과 인간이 구별할 수 있는 최대 Color 개수인 3.24 Million Color 대비 CRT Display(sRGB)의 경우 35.684%, DLP Display의 경우 39.85%, MPD의 경우 50.26%, Laser Display의 경우 83.479%가 산출 되었다.

즉, Color Gamut에 단위 Cubic을 넣어서 계산했을 때 CRT Display (sRGB)에서 0.817164 Million Color, DLP Display에서 0.912559 Million Color, MPD에서 1.15106 Million Color, Laser Display에서 1.19169 Million Color의 인간이 구별할 수 있는 Color 개수를 산출하였다. 또한, Color Gamut에 단위 Sphere (직경  $\Delta E=1$ )를 넣어서 계산했을 때 CRT Display (sRGB)에서 1.15616 Million Color, DLP Display에서 1.29113 Million Color, MPD에서 1.62858 Million Color, Laser Display에서 2.70475 Million Color의 인간이 구별할 수 있는 Color 개수를 산출하였다.

표 1은 기존 방법과 본 논문에서 제안하는 방법으로 구한, 인간이 구별할 수 있는 최대 Color 개수인 3.24 Million Color 대비 백분율과 인간이 구별할 수 있는 Color 개수를 비교하였다.

	기존 방법		제안하는 방법	
	%	Million Color	%	Million Color
sRGB	33.19	1.075	35.68	1.15616
DLP	35.09	1.137	39.85	1.29113
MPD	58.91	1.908	50.26	1.62858
Laser	65.42	2.119	83.48	2.70475

표 1. 실험 결과

#### IV. 결론

본 논문에서는 Display 장치들을 평가하는 기준 중 하나인 인간이 구분할 수 있는 Color Gamut의 체적을 인간의 Perception을 기준으로 평가하는 정량적 기법을 제안하였다. 실험 결과 CIE-UCS Chart 2 Dimension으로 Color

Gamut 면적을 구하는 방법과 CIE-L\*a\*b\*에서 3 Dimension으로 Color Gamut 체적을 구하는 방법에는 표 1과 같이 상당히 차이가 많이 나는 것을 알 수 있다. 즉, 본 논문에서 제안하는 인간의 Perception에 Uniform한 Color Space에서 3차원적으로 평가하는 정량적 기법이 더 적합하다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 향후 모든 Display의 Color Gamut 평가 기준은 본 논문에서 제시한 바와 같이 인간의 Color Vision을 밑바탕으로 이루어져야 함이 보다 바람직할 것이다.

#### 참고문헌

- [1] B. Hill, Roger, and F. W. Vorhagen, "Comparative Analysis of the Quantization of Color Space on the Basis of the CIELAB Color-Difference Formula", ACM Transactions On Graphics, Vol. 16. No. 2. April. 1997. 109-154
- [2] IEC. 61966-2-1 Default RGB Color Space - sRGB, 1999.
- [3] CIE. 1995. Industrial color-diffenence evaluation. CIE Pub. 116, Commission International de L'Eclairage, Vienna.
- [4] Colorimetry. CIE Pub. 15.2, 2<sup>nd</sup> ed., Commission International de L'Eclairage, Vienna, 29-31.
- [5] Colorimetry. CIE Pub. 15.2, 2<sup>nd</sup> ed., Commission International de L'Eclairage, Vienna, 56-58.
- [6] Lang, H. 1995. Farbwiedergabe in den Medien, Fernsehen, Film, Druck. Muster-Schmidt Verlag, Gottingen, Zurich.