

C군의 B급 잡설, 色 : 第十篇

색(色)에 관한 연재가 열 번째를 맞이하며 이번 호에서 막을 내립니다. 비교적 짧은 지면을 통해서 한 달 간격으로 연재가 되다 보니 내용의 연결이 부드럽지 못한 경우도, 이해에 수고가 없을 정도로 쉽게 설명을 풀어내지 못한 경우도 있었을 것 같습니다. 하지만 지금까지 연재된 내용의 50%만 기억해도 대한민국 방송기술인으로서의 직업전선에 유용한 지식으로 남을 것이라고 부득부득 우기며, 기필코 마지막 연재의 대미를 폭풍감동으로 휘감아 독자 여러분의 눈물샘(?)을 모조리 말려버리겠습니다.

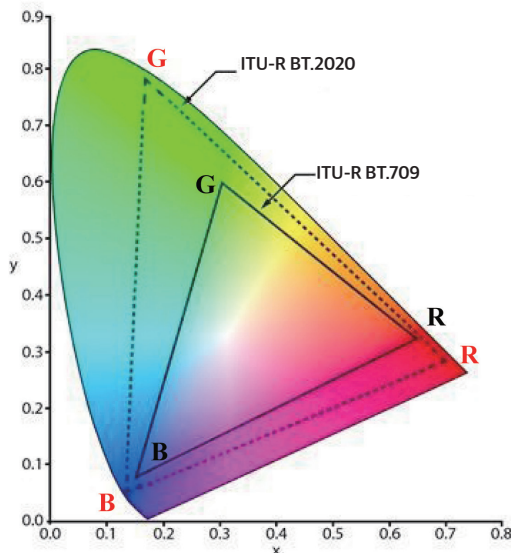


그림 1. CIE 1931 색도분포표
/ 출처 : www.stylezineblog.com

벌써 [그림 1]을 몇 번이나 써먹고 있는지 모르겠습니다. 하지만 잦은 등장만큼 중요하다는 의미도 되니 조금만 더 인내를 발휘하여 집중해주시길 부탁드립니다. 'CIE 1931 색도분포표'의 탄생과정은 지난 1편부터 9편까지의 연재에서 귀에 못이 박이도록 반복된 이야기이므로 본 10편에서 따로 언급하지는 않겠습니다. 본편에서 주목하는 것은 [그림 1]에 보이는 'ITU-R BT.2020'과 'ITU-R BT.709'라는 표시입니다. 혹시나 이 표시의 의미를 모르는 독자들을 위해 간단한 설명을 붙이겠습니다. ITU-R에서 ITU는 'International Telecommunication Union'의 머리글자로 우리말로는 '국제전기통신연합'이라고 하며 뒤에 붙는 R은 'Radiocommunication'의 머리글자입니다. 그러므로 ITU-R은 국제전기통신연합의 라디오주파수대역에 관한 규약들을 다루고 있는 분과입니다. ITU-R까지는 설명이 되었고 BT.2020과 BT.709는 무엇일까요? BT는 'Broadcasting service: Television'으로서 ITU-R에서 텔레비전 방송업무와 관련된 기술관련 권고들입니다. 이 텔레비전 방송기술관련 권고 중에 BT.709는 HDTV 방송의 색영역(Color Gamut)을 정의하고 있고, BT.2020은 UHD TV 방송의 색영역을 정의하고 있습니다.

ITU-R의 권고에서도 'CIE 1931 색도분포표'가 사용되고 있으니 CIE의 측색법(Colorimetry)이 얼마나 일반적으로 사용되는 색의 측정 및 표현 방법인지 쉽게 알 수 있습니다. 그러면 이제 BT.709와 BT.2020을 조금 더 깊게 살펴보도록 하겠습니다. BT.709에 정의된 HDTV의 색영역은 [표 1]과 같습니다.

ITU-R BT.709에 정의된 HDTV 색영역 관련 정보는 [표 1]과 같습니다. 예상과 달리 4개의, xy 값이 전부라니 조금은 허무한 느낌도 듭니다. 하지만 필요한 정보는 [표 1] 안에 다 있습니다. [표 1]로부터 HDTV의 색영역이 어떻게 정의되는지에 관해 하나하나 전개해나가겠습니다. [표 1]에서 R,G,B는 0~1 사이의 실수값을 갖는 카메라 센서의 출력신호, 또는 TV 디스플레이 패널의 입력신호라고 보면 됩니다. 여기서 카메라 센서의 출력신호, 또는 TV 디스플레이 패널의 입력신호라고 표현한 것은 영상의 촬영과 표시 모두 [표 1]의 내용이 적용되기 때문입니다.

그런데 여기서 일부 독자들께서는 “방송에서 영상신호는 YCbCr인데 왜 RGB를 이야기하지?”라는 의문을 가지실 것입니다. 방송영상은 피사체에서 반사된 빛이 카메라 렌즈에 입사하여 이미 지 센서에서 감광되는 것으로 시작합니다. 하지만 이미지 센서는 빛의 세기만을 감지할 수 있을 뿐, 빛의 색을 감지할 수는 없습니다. 빛의 색이 다르더라도 그 세기가 같다면 이미지 센서에서 감광된 신호의 세기는 같습니다. 또한, 디스플레이의 경우도 비슷한 제약이 있습니다. 디스플레이에 사용되는 발광소자 중에 인간이 볼 수 있는 가시영역의 색을 모두 표시할 수 있는 발광소자는 없습니다. 모든 발광소자는 특정 색을 발광할 수 있을 뿐입니다. 그렇다면 빛의 색을 어떻게 감지하고, 이를 어떻게 디스플레이에서 다시 재현할까요? 이는 빛을 RGB 삼원색으로 분리하여 감지한 후, 이 삼원색의 조합으로 디스플레이에서 재현하는 것으로 해결할 수 있습니다. 즉, 이미지 센서 앞에서 렌즈를 통과한 빛이 RGB 삼원색으로 분리되고, 이미지 센서의 각 셀(cell)은 RGB 삼원색 중 하나의 세기만을 감지하는 것입니다. 또, 디스플레이의 경우는 각 화소마다 RGB 삼원색에 대응하는 발광소자들이 해당하는 각각의 원색 신호의 세기에 따라 발광하게 됩니다. 이때 각 발광소자들이 인간의 눈이 가지는 공간분해능보다 더 조밀하게 밀집되어 있어서 개별 발광소자의 원색 대신 그 원색들이 합쳐진 색으로 보이는 것입니다. 하지만 여러 이유로 이 RGB 삼원색에 대응되는 신호를 그대로 저장하거나 전송하는 것 보다 이를 YCbCr로 바꾸어 저장하거나 전송하는 것이 효율적이었습니다. 이 여러 이유 중에 전송 대역폭이라던가, 영상처리용 회로의 구현 등에 관한 이유가 포함됩니다. 본편에서는 색에 관한 이슈에만 집중하여 카메라에서 촬영된 영상의 최초형태이며 TV 디스플레이 패널에서 출력되기 직전의 형태인 RGB 삼원색 신호에만 초점을 맞추어 설명을 진행하겠습니다. RGB 삼원색 신호가 카메라에서 YCbCr로 변형되어 여러 처리와 전송을 거친 뒤 TV에서 다시 RGB 삼원색으로 복원되는 전 과정과 그 이론적 바탕에 대해서는 C군이 언젠가 공부를 많이 하여 뭔가 더 알 것 같을 때 다시 연재하는 것으로 하겠습니다. (^_^)

	x	y
R	0.640	0.330
G	0.300	0.600
B	0.150	0.060
기준백색(D65)	0.3127	0.3290

표 1. ITU-R BT.709에 정의된 HDTV 색영역

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \quad \dots \dots \dots \text{수식 1} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z} \end{aligned}$$

다시 환기하지만 [표 1]의 RGB는 카메라에서 감광된 RGB 삼원색 신호의 세기 또는 TV의 디스플레이 패널에 입력되는 삼원색 신호의 세기이며 그 값은 0~1 사이의 실수입니다. 그리고 [표 1]의 x, y는 [그림 1]에 표시된 ITU-R BT.709 삼각형의 각 꼭지점과 기준백색에 해당하는 x, y 좌표입니다. 그런데 벌써 우리 독자들께서는 뭔가 뇌리에 번쩍(!) 할 것입니다.

**“왜 RGB의 값은 0~1 사이라고 해놓고 x, y 좌표값은 달랑 하나씩이지?
x, y 값도 RGB의 0~1에 대응하도록 어떤 범위로 지정되어야 하는 것 아닌가?”**

[수식 1]에 그 답이 있습니다. x, y 값은 실제 빛의 세기와 연관이 된 X, Y, Z 값의 비율과도 같습니다. 다시 말해서 R 신호가 0~1 사이라고 하면 그에 해당하는 X, Y, Z 값은 R 값이 커짐에 따라 같이 커지지만, 그 X, Y, Z 값의 비율인 x, y 값은 변하지 않기 때문입니다. 더 쉽게 설명하면 신호가 0.5일 때 X, Y, Z 값이 각각 α, β, γ 라고 가정하면 R 신호가 1.0으로 두 배가 되면 X, Y, Z 값은 각각 2α, 2β, 2γ 가 되므로 [수식 1]에 따라 x, y 값을 계산해보면 모두 R 값에 상관없이 같은 값을 가지게 됩니다. 그러므로 R 값이 0~1 사이 어디에 있던 상관없이 그 x, y 값은 항상 같은 값을 가지게 되는 것입니다.

그렇지만 여기에서 멈추지 않을 우리 독자들의 예리함을 C군은 알고 있습니다. 또 하나의 혜성 같은 의문이 우리 독자들의 학구열을 빗처럼 가르고 지나가고 있다는 것을.....

“왜? 도대체 왜 RGB의 x, y 좌표값 세 개만 [표 1]에 있는데, [그림 1]에서는 삼각형을 떠~억(!)하고 그려놨지?”

이에 대한 대답을 위해 비교적 설명이 쉬운 디스플레이의 경우를 예로 들겠습니다. 여기서 디스플레이는 이상적인 물리적 성질을 갖는다고 가정합니다. 각 화소는 RGB 삼원색에 대응하는 발광소자의 그룹이라고 할 때, 각각의 발광소자에서 나온 임의의 세기를 갖는 삼원색의 빛이 합쳐진 빛의 색이 갖는 x, y 값은 [표 1]의 신호에 대응하는 x, y 값들을 가중치의 합이 1이 되게 하여 모두 더한 것과 같습니다. 왜 가중치가 1이 되도록 하여 더하는지는 [수식 1]을 통해 증명될 수 있으며, 지면 관계상 자세한 설명은 생략합니다. 임의의 좌표계에 삼각형을 그리고, 각 꼭짓점의 좌표값에 합이 1이 되는 가중치들을 곱하여 모두 더한 새로운 좌표는 그 삼각형 내부의 점의 좌표가 되는 것은 별도의 설명이 필요 없을 정도로 익숙한 사실입니다. 카메라의 경우도 반대로 생각하면 매우 쉽게 이해할 수 있습니다. 이로써 [표 1]에서 정의된 RGB 삼원색 신호의 x, y 값으로 어떻게 [그림 1]과 같은 HDTV의 삼각형 색영역이 정의되는지 알 수 있습니다. 그러나 여전히 질문은 꼬리에 꼬리를 뭍니다.

“왜? 왜? 도대체 왜 기준백색이라는 것을 정의하지?”

기준백색이라는 것을 정의한 이유는 카메라 또는 TV에서 RGB 삼원색 신호의 최대값에 대응하는 백색을 정하기 위한 것입니다. 자세한 이야기를 여기서 다 펼치기는 힘들지만, 기본적으로 인간이 사물을 보는 것은 조명에서 나온 빛이 사물에서 반사된 것을 보는 것입니다. 따라서 조명이 바뀌면 사물의 색도 바뀝니다. 예로 하얀 벽지가 있을 때 태양광 아래서 보는 하얀 벽지와 형광등 아래서 보이는 하얀 벽지는 분명히 다른 색의 벽지입니다. 그러나 우리는 언제나 그 벽지를 하얗다고 생각합니다. 이는 인간의 뇌가 특정조명 아래서 흰색에 대한 기준점을 적응적으로 바뀌어나가기 때문입니다. 다시 말하면 우리가 일상적인 경험을 통해서 쌓은 사물의 색에 관한 고정관념이 조명에 따라 시시각각 변하는 사물의 겉보기 색에 영향을 미친다는 것입니다. 카메라에서 ‘화이트 밸런스’를 조절하는 것도 바로 기계가 물리법칙에 따라 얻어낸 겉보기 색을 인간의 뇌가 고정관념을 바탕으로 재구성한 색으로 바꿔주는 과정입니다. 이러한 겉보기 색과 인간의 뇌가 재구성한 색의 차이 때문에 기준백색이라는 것을 정하여 RGB 삼원색 신호의 최대값에 대응하는 백색을 정의하는 것입니다.

드디어 뭔가 각이 하나씩 잡혀갑니다. 그러나 여전히 제일 근본적인 물음에 대한 답은 나오지 않았습니다.

“왜? 왜? 왜? 도대체 왜 [표 1]은 RGB 삼원색에 대한 각각의 x, y 값만 대응시켜 놓고

RGB 삼원색이 혼합된 색에 대한 x, y 값은 정의하지 않고 있지?

위 질문에 대한 대답은 이렇습니다. [표 1]이 겉보기에는 RGB 삼원색 신호에 대한 각각의 x, y 값만 대응시켜 놓은 것 같지만, 조금만 풀어서 보면 RGB 삼원색 신호가 혼합되어 만드는 색에 대한 x, y 값들이 유도될 수 있는 조건은 모두 포함하고 있다고 말합니다. 방법은 이렇습니다. 일차적으로 [표 1]의 RGB 삼원색 신호와 X, Y, Z의 관계식을 구한 다음 x, y 값은 [수식 1]을 통해 구하면 됩니다. [표 1]의 값들을 보고 RGB와 XYZ 사이의 관계식을 유도하는 것은 일차식을 조작하는 기초 중의 기초이니 과정은 생략하고 결론만 [수식 2]에 적겠습니다.

$$\begin{aligned} X &= 0.412R + 0.358G + 0.180B \\ Y &= 0.213R + 0.715G + 0.072B \dots\dots\dots \text{수식 2} \\ Z &= 0.019R + 0.119G + 0.950B \end{aligned}$$

여기서 한 가지 유의할 사항은 [수식 2]를 유도하는 과정에 회도를 나타내는 Y의 최대값을 1로 설정한 것입니다. 이 값은 C군이 임의로 설정하는 했지만, 대충 아무 이유 없이 편의에만 입각하여 정한 값이 아닙니다. 회도의 최대값을 정하지 않는 것은 ITU-R BT.709 뿐만 아니라 대부분의 CIE 측색법 관련 내용에서도 많이 나타나는 사항인데, 색을 이야기함에 있어 회도의 최대값을 따로 정하지 않는 경우가 일반적이기

때문입니다. 이유는 아마도 아래와 같을 것 같습니다. 조명은 그 색이 같다고 하더라도 세기가 때와 장소에 따라 변할 수 있습니다. 또한, 조명의 밝기에 따라 인간의 뇌도 시시각각 적응 과정을 거치게 됩니다. 처음에 실내에 들어갔을 때 어둡게 느끼다가 시간이 지나면서 점점 밝게 느끼는 것이 이에 해당합니다. 아마도 이런 이유를 포함하여 여러 복잡한 문제들 때문에 밝기와 색을 분리하여 다루는 것이 편했을 것 같습니다. 밝기는 일정 범위로 정규화된 상태로 색을 수치화하고, 조명의 세기에 따른 가중치를 상황에 따라 반영하여 색에 관한 수치를 조절하는 것이 훨씬 유용했을 것이라는 C군의 건전한(?) 추리에 대한 지지를 호소하며 [수식 2]에 관한 마지막 설명을 이어가겠습니다.

[수식 2]에서 G, B값을 0으로 놓고 R값만을 0에서 1까지 변화시켜가며 X, Y, Z 값을 구한 후 [수식 1]을 이용해 x, y 값을 구하면 항상 [표 1]과 같이 $x=0.640$, $y=0.330$ 이 나올 것입니다. G와 B를 0으로 놓고 R값만 0~1까지 변화시키는 것은 빨강 빛이 색은 고정된 채로 점점 휘도만 밝아지는 것과 같습니다. 다른 모든 값을 0으로 설정하고 G값과 B값만 0에서 1까지 변화시켜가며 같은 계산을 해봐도 마찬가지입니다. 이로써 [그림 1] CIE 색도분포표는 휘도와는 상관없이 색성분 자체만을 나타내는 분포표라는 것을 쉽게 이해할 수 있습니다. [수식 2]에서 RGB 값을 모두 1로 하여 X, Y, Z 값을 구한 다음 [수식 2]로 x, y 값을 구하면 D65 기준광원에 해당하는 $x=0.3127$, $y=0.3290$ 을 얻을 수 있습니다. 여기까지의 설명으로 ITU-R BT.709에서 정한 HDTV 색영역에 관한 충분(?)한 지식을 얻으셨습니다. 그러면 [그림 1]의 ITU-R BT.2020이라고 적힌 삼각형은 무엇일까요? 네, 이는 UHDTV의 색영역을 정의한 것입니다. ITU-R BT.2020에 관한 내용을 [표 2]에 정리하였습니다. [표 1]을 이용하여 HDTV 색영역에 관한 여러 사실들을 유도해 낸 방법과 똑같은 방법으로 [표 2]를 통해 UHDTV 색영역에 관한 여러 사실을 유도할 수 있습니다. 이렇듯 같은 내용이 반복되기 때문에 UHDTV 색영역에 관한 뻘한 내용은 반복하지 않고 HDTV 색영역과 비교하여 특이한 점만 설명하도록 하겠습니다.

	x	y
R	0.708	0.292
G	0.170	0.797
B	0.131	0.046
기준백색(D65)	0.3127	0.3290

표 2. ITU-R BT.2020에 정의된 UHDTV 색영역

[그림 1]에서 보이듯이 인간의 가시영역을 나타내는 말발굽 모양의 내부에서 HDTV가 표현할 수 있는 색의 범위는 충분히 넓지 못했습니다. 그래서 ITU-R은 BT.2020을 통해 UHDTV에서 최대한 넓은 범위의 색을 표현할 수 있도록 새로운 색영역을 정의했습니다. 한 가지 흥미로운 점은 [표 2]에 정의된 RGB 삼원색 신호에 대응하는 x, y 값을 가지는 광원을 구현하려면 레이저(laser)를 사용해야 한다는 것입니다. 이유에 대한 설명은 간단합니다. [그림 1]을 보면 ITU-R BT.2020에 대응하는 삼각형의 꼭짓점들은 말발굽 모양의 외곽선에 매우 근접해있습니다. 앞서 여러 번 언급되었듯이 말발굽 모양의 외곽선에 위치하는 색을 내는 빛은 모두 하나의 파장을 갖는 빛들입니다. 그리고 이렇게 특정 파장에 에너지가 집중된 빛을 구현하는 방법은 레이저를 이용하는 방법 밖에 없습니다. 이를 바꿔 말하면 레이저를 사용할 수 없는 현재의 디스플레이 기기로는 ITU-R BT.2020에 정의된 색영역을 모두 표현할 수 없다는 이야기입니다. 아마도 독자들께서는 여기에 마지막 질문을 던질 것 같습니다.

그렇다면 왜 ITU-R은 현재 물리적으로 구현 불가능한 색영역을 표준으로 정했을까?

C군도 풍문으로 들은 이유는 이렇습니다. HDTV의 색영역 표준을 정하던 시절, 너무 당시의 기술수준을 의식한 나머지 보수적으로 색영역을 정했습니다. 하지만 얼마 지나지 않아 예상보다 빠른 기술발전의 속도 때문에 HDTV의 색영역 표준이 당시의 기술수준에 뒤쳐진 표준이 되어 버렸다고 합니다. 이에 대한 학습효과로 인해서인지, ITU-R은 과거와 같은 불합리한 상황이 반복되는 것을 막기 위해 당장 구현은 불가능하지만 이론적으로 가능한 최대한의 범위를 새로운 UHDTV 색영역으로 정했다고 합니다.

이로써 색에 관한 열편의 연재를 마치겠습니다. 다음 호부터는 조금 더 황당한(?) 잡학의 세계를 탐구하기 위해 외국어 영역으로 잡설의 영역을 확대해보도록 하겠습니다. 📖

P.S. C군의 잡설은 귀동냥에 근거하여 재구성된 것이므로 사실과 다를 수 있음을 항상 유념해주세요.