

C군의 B급 잡설, 色 : 第四篇

조인준 KBS 기술연구소 차장

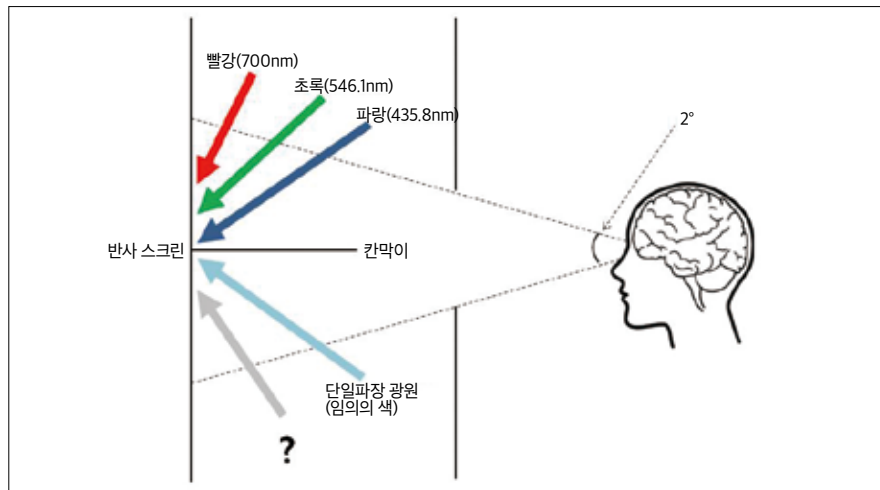
안녕하세요. 언제나 업계 유행과는 거리가 있어 보이는 지루한 소재로 항상 독자 여러분의 직업전선에 피로감만 더해드리는 것 같아 송구스러운 마음뿐인 C군입니다. 이번 호에서도 여전히 송구스럽게 지난 호부터 시작한 'CIE 1931 측색법'을 위한 실험의 본격적이고 심층적인 설명을 이어가겠습니다. 워낙 복잡하게 전개되는 이야기이다 보니, 중간중간 연재의 도입부에 지난 내용을 요약해드리는 것이 이해에 좋을 것 같습니다. 지난 호의 주요 내용을 짧게 추리면 아래와 같습니다. 지난 내용이 기억에 남아있는 독자께서는 아래의 간추린 내용만으로 충분히 머릿속을 재부팅하는 것이 가능하시겠지만, 아래의 내용만으로 재부팅이 불가하신 독자께서는 번거롭더라도 지난 호의 내용을 다시 확인해보셔야 할 것 같습니다. 물론, 'CIE 1931 측색법'에 중대한 관심이 없으시다면 그냥 재부팅되지 않은 상태로 진행하셔도 무방합니다.

- 1931년 9월 18일 캠브리지 대학에서는 CIE(Commission Internationale E'clairage, 국제조명위원회)의 측색법(Colorimetry, 색을 측정하는 방법) 위원회 회의가 열렸고, 이 회의에서 'CIE 1931 측색법'의 의결이 이루어졌음.
- 'CIE 1931 측색법'의 기초가 되는 실험은 1920년대 후반 영국에서 진행되었음. 실험을 진행한 주인공은 임페리얼 컬리지(Imperial College)의 W. D. 라이트(Wright)와 국립 물리학 연구소(NPL, National Physical Laboratory)의 J. 길드(Guild)였으며, 이 두 사람은 각각 독립적으로 실험을 진행하였음.
- 1929년 W. D. 라이트는 10명의 피실험자들을 대상으로 파장 650nm의 빨강색 광원, 파장 530nm의 초록색 광원, 파장 460nm의 파랑색 광원의 세기를 조절하여 파장 400nm~700nm 사이의 단일파장 가시광선의 색을 10nm 간격으로 똑같이 재현하도록 하는 실험을 하였음.
- W. D. 라이트는 10명의 피실험자들이 400nm~700nm 사이의 가시광선의 색을 똑같이 맞추기 위하여 조절한 빨강(650nm), 초록(530nm), 파랑(460nm) 광원의 세기를 표로 정리함.

위의 내용이 지난 호에서 설명해 드린 것들에 관한 요약입니다. 무엇을 위한 실험이었는지는 대체로 감 잡으셨을 거로 생각합니다. 지금처럼 컴퓨터도 없고, 인간의 눈과 시신경에서 실제로 물리적인 신호가 어떻게 전달되고 처리되는지에 관한 과학적 실험도 어렵던 시절에 임의의 색과 등가의 색을 내는 빨강(650nm), 초록(530nm), 파랑(460nm) 광원의 혼합으로 색을 객관적으로 표현하고자 했던 것입니다. 물론 이 색의 혼합을 판단하는 것은 정상적인 시각을 가진 보통의 사람들이었습니다. 언뜻, 주관이 개입되는 실험이다 보니 그 결과의 정확성에 의문이 드는 것이 당연합니다. 하지만 놀랍게도 예상보다 사람들의 색감각은 큰 편차가 없이 거의 일치하였고, 이는 J. 길드의 실험을 통해서도 증명이 되었습니다. J. 길드와 W. D. 라이트의 실험에서 가장 놀라운 것은 서로 다른 원색광원을 사용하여 실험을 수행하였음에도 두 실험의 결과가 거의 완벽에 가까운 정도로 일치하며 상호변환이 된다는 것입니다.

J. 길드는 W. D. 라이트보다 먼저 측색법에 관한 실험을 수행하였지만 W. D. 라이트가 실험결과를 발표할 때까지 자신의 실험

결과를 공개하지 않았다고 합니다. W. D. 라이트의 실험결과가 발표된 후, 자신의 실험결과와 놀랍게 일치하는 것을 발견하고는 자신의 실험결과를 공개했다고 합니다. 그 이유에 대해 C군은 이리저리 구글(Google)을 통해 수소문해봤지만 끝내 알 수 없었습니다.



[그림 1] J. 길드의 실험

[그림 1]에 J. 길드의 실험방법이 묘사되어 있습니다. J. 길드의 실험에서는 시야각이 2°가 되도록 구멍을 뚫은 벽 뒤에 임의의 단일 파장을 가지는 광원과 빛의 세기를 조절할 수 있는 빨강 광원(파장 700nm), 초록 광원(파장 546.1nm), 파랑 광원(파장 435.8nm)이 칸막이를 사이에 두고 떨어져 있고, 이들 광원에서 나온 빛은 스크린에 반사되어 관찰자의 눈으로 입사하게 됩니다. 이때 빨강, 파랑, 초록 광원의 세기는 관찰자가 조절할 수 있습니다. 시야각이 2°가 되도록 구멍을 뚫은 이유는 원추세포(색을 감각하는 세포)가 집중된 황반에만 빛을 투사하기 위함입니다. 실험에서 피실험자의 역할은 하단 푸른 화살표로 표시된 임의의 단일파장 광원의 색과 빨강, 초록, 파랑 광원의 빛을 합해서 만들어지는 색이 같아지도록 빨강, 초록, 파랑 광원의 세기를 조절하는 것입니다. J. 길드는 7명의 피실험자를 대상으로 푸른 화살표로 표시된 광원의 파장을 380nm에서 780nm까지 5nm 간격으로 증가시켜가며 같은 색을 내는 빨강, 초록, 파랑 광원의 세기를 기록하였습니다.

지난 호에서 소개해드린 W. D. 라이트의 실험방법을 기억하고 계신 독자께서는 아마도 고개를 갸웃하실 것 같습니다.

“둘이 서로 다른 실험을 진행했다고 하는데..... 도대체, 뭐가 다르지?”

지난 호에 실린 W. D. 라이트의 실험방법을 묘사한 그림과 [그림 1]의 차이점을 비교하다 보니, 본의 아니게 ‘숨은그림찾기’가 되어버렸습니다. 사실 그림 자체는 똑같습니다. W. D. 라이트의 실험과 J. 길드의 실험의 차이점은 빨강, 초록, 파랑 광원의 파장입니다. W. D. 라이트는 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑)의 파장을 가지는 광원을 사용하였고, J. 길드는 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 파장을 가지는 광원을 사용하였습니다. 그런데 나중에 확정된 ‘CIE 1931 측색법’에서는 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 파장을 가지는 광원을 표준으로 사용합니다. 명확히 이유가 설명된 자료를 찾지는 못했지만, 그 이유에 대해 C군은 다음과 같이 추리해보았습니다.

표준이라는 것은 그에 관한 모든 사실들이 어디에서건 손쉽게 재현되어야 합니다. 실험을 하는 환경이나 조건, 또는 실험자에 따라서 그 결과가 달라진다면, 그 실험의 결과는 표준으로 사용하기에 문제가 많을 수밖에 없습니다. 그런 의미에서 ‘CIE 1931 측색법’이 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑) 파장의 광원을 표준으로 사용했다는 것은, 이 광원들이 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑) 파장의 광원보다 정확히 구현하기 쉬워서가 아닐까 생각해봅니다. 1931년의 기술수준을 유

추해보면, 단일파장의 빛을 만들기 위해서 비교적 외부의 영향에 둔감하며 일정한 성질을 유지하는 어떤 광원에 물리적인 광학필터를 씌웠을 것으로 추측됩니다. 이 물리적 광학필터를 구현하는 방법에 있어서 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 단일파장 광원을 구현하는 것이 훨씬 용이했을 거라는 추측입니다. 망언을 하자면, 아무렇게나 대충 만들어도 기가 막히게 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 단일파장 광원을 구현하는 방법이 존재했을 거라는 것이 C군의 건전하고 부실한 추리입니다. 물론, 아무리 구굴을 뒤흔치고 다녀도 근거자료를 찾기가 힘든 것이 사실이므로 이런 C군의 추측은 믿거나 말거나입니다.

그러면 이제 W. D. 라이트의 실험과 J. 길드의 실험이 어떻게 상호 호환되는지 설명하겠습니다. W. D. 라이트는 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑) 파장의 광원의 세기를 조절하여 400nm~700nm 사이의 단일파장 빛의 색을 재현하였고, J. 길드는 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑) 파장의 광원의 세기를 조절하여 380nm~780nm 사이의 단일파장 빛의 색을 재현하였습니다. 여기서 두 실험의 호환을 확인하기 위해 약간의 트릭을 고안해보겠습니다. W. D. 라이트의 광원들은 모두 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑)의 단일파장 광원입니다. 그러면 이 광원들도 각각 J. 길드의 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 단일파장 광원으로 표현이 가능하지 않을까요?

“네, 당연히 그렇게 표현이 가능합니다.”

조금 수리과학적 냄새 물씬 풍기게 표현해보면 대충 아래와 같게 됩니다.

$$\begin{aligned} 650\text{nm(빨강)} &= A1 \times 700\text{nm(빨강)} + A2 \times 546.1\text{nm(초록)} + A3 \times 435.8\text{nm(파랑)} \\ 530\text{nm(초록)} &= B1 \times 700\text{nm(빨강)} + B2 \times 546.1\text{nm(초록)} + B3 \times 435.8\text{nm(파랑)} \quad \dots\dots\dots \text{식(1)} \\ 460\text{nm(파랑)} &= C1 \times 700\text{nm(빨강)} + C2 \times 546.1\text{nm(초록)} + C3 \times 435.8\text{nm(파랑)} \end{aligned}$$

여기서 A1, A2, A3는 650nm(빨강) 광원의 색과 동일한 색을 내는 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 혼합비라고 보면 됩니다. B1, B2, B3와 C1, C2, C3도 같은 내용입니다.

예를 들어 W. D. 라이트의 실험에서 590nm 단일파장 광원의 색과 등가의 색을 내는 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑)의 혼합비가 ㉠, ㉡, ㉢라고 하면 아래와 같이 쓸 수 있습니다.

$$590\text{nm의 색} = \text{㉠} \times 650\text{nm(빨강)} + \text{㉡} \times 530\text{nm(초록)} + \text{㉢} \times 460\text{nm(파랑)} \quad \dots\dots\dots \text{식(2)}$$

J. 길드의 실험에서도 마찬가지로 590nm 단일파장 광원의 색과 등가의 색을 내는 700nm(빨강), 546.1nm(초록), 435.8nm(파랑)의 혼합비가 ㉠, ㉡, ㉢라고 하면 다음과 같이 쓸 수 있습니다.

$$590\text{nm의 색} = \text{㉠} \times 700\text{nm(빨강)} + \text{㉡} \times 546.1\text{nm(초록)} + \text{㉢} \times 435.8\text{nm(파랑)} \quad \dots\dots\dots \text{식(3)}$$

W. D. 라이트의 실험과 J. 길드의 실험이 호환되는 것은 식(2)의 650nm(빨강), 530nm(초록), 460nm(파랑) 자리에 식(1)을 대입하여 정리한 것이 식(3)과 같아지는 것으로 증명이 가능합니다. 실제로 위에서 예로 든 590nm 뿐만 아니라 W. D. 라이트가 10nm 간격으로 실험한 400nm~700nm 사이의 데이터를 모두 이용하여 J. 길드의 실험으로 환산해보면, 매우 미세한 오차로 J. 길드의 실험결과와 일치하는 것을 볼 수 있다고 합니다. 물론, C군이 직접 계산해보지는 않았습니니다. 인터넷의 많은 신

위할 수 있는 자료들이 그렇다고 말하고 있으니, 그냥 믿고 넘어가겠습니다.

본론으로 돌아와서, 사실 이 두 실험이 거의 완벽에 가깝게 호환되는 것이 놀라운 이유는 각각 10명과 7명의 피실험자를 대상으로 한 소규모의 실험임에도 불구하고 거의 오차가 없는 결과를 얻었다는 사실입니다. 바꾸어 이야기하면, 독립적인 두 실험이 일치하는 결과를 보여준다는 것은 두 실험의 완전성이 스스로 증명되었다는 것입니다. 주관이 개입되기 쉬운 사람의 판단에 기초한 실험으로 이렇게 완벽에 가까운 결과를 얻었기에, 이 실험에 기반한 'CIE 1931 착색법'이 80년 넘게 유용하게 쓰이고 있는 것 같습니다.

J. 길드는 자신의 실험결과를 W. D. 라이트의 실험결과와 종합하여 1931년 캠브릿지 대학교의 한 강의실에서 열린 CIE 착색법 위원회 회의에 제출합니다. 사실 W. D. 라이트나 J. 길드의 실험결과는 그 자체로 착색법이 아닙니다. 이들의 실험결과는 '표준적인 관찰자'에 가깝습니다. 갑자기 '표준적인 관찰자'라는 표현이 낯설죠? 하지만, W. D. 라이트와 J. 길드의 실험을 되돌아 보면 '표준적인 관찰자'라는 표현이 이해가 갈 겁니다. W. D. 라이트와 J. 길드의 실험은 본질적으로 여러 사람의 색감각에 관한 결과를 평균 내어 우리가 상상하는 '색의 이상적인 관찰자'를 추정한 것이기 때문입니다. 다시 말해서, 이들의 실험은 '색의 이상적인 관찰자'가 보았을 때 임의의 색과 같은 색을 내는 표준의 빨강, 초록, 파랑의 혼합비를 구한 것입니다. 그리고 이 '색의 이상적인 관찰자'가 결정된 표준의 빨강, 초록, 파랑의 혼합비는 인간이 감각하는 색과 1:1로 대응되는 속성이 되어 색측정의 기초를 이루게 된 것입니다. [표 1]에 CIE 위원회에 제출된 W. D. 라이트와 J. 길드의 실험결과 종합의 일부를 요약했습니다.

파장(nm)	빨강(700nm)	초록(546.1nm)	파랑(435.8nm)
380	0.0272	-0.0115	0.9843
385	0.0268	-0.0114	0.9846
390	0.0263	-0.0114	0.9851
⋮	⋮	⋮	⋮
435	0.0012	-0.0007	0.9995
440	-0.0084	0.0048	1.0036
⋮	⋮	⋮	⋮
545	-0.0293	1.0282	0.0011
550	0.0974	0.9051	-0.0025
⋮	⋮	⋮	⋮
700	1.0000	0.0000	0.0000
705	1.0000	0.0000	0.0000
710	1.0000	0.0000	0.0000
⋮	⋮	⋮	⋮
780	1.0000	0.0000	0.0000

[표 1] CIE 위원회에 제출된 W. D. 라이트와 J. 길드의 실험결과 요약

[표 1]을 보면 당연한 결과지만 파랑 광원(435.8nm)의 파장 부근인 435nm와 440nm에서는 파랑 광원의 세기가 거의 1에 접근하고 빨강, 초록 광원이 미세하게 혼합됩니다. 초록 광원(546.1nm)의 파장 부근인 545nm와 550nm에서도 초록 광원이 지배적입니다. 빨강 광원(700nm)의 파장과 일치하는 700nm에서만 다른 광원들의 세기가 0입니다. 중간중간 표에 나타나는 음수의 의미는 지난 호에서 설명해 드렸으니 여기서 반복은 피하겠습니다. 한 가지 재미있는 것은 파장이 700nm를 넘어가면 피실험자들이 모두 빨강 광원(700nm)과 같은 색으로 감각한다는 것입니다. 이 경우 700nm 이상의 실험이 무슨 의미가 있어서 'CIE 1931 착색법'을 위한 자료에 기록이 되어있는지 C군은 아직 이유를 발견하지 못했습니다.

여기까지 간략하게 W. D. 라이트와 J. 길드의 실험에 관해 말씀드렸습니다. 간단하게 설명해도 문제가 없을 것 같은 이들의 유사한 실험을 2회에 걸쳐 소개해드린 이유는, 이후에 이어지는 'CIE 1931 착색법'의 본질적 특성에 관한 직관을 드리기 위함이었습니다. 다음 호에서는 내용의 특성상 다소 복잡한 전개를 피할 수는 없지만, 최대한 부담 없이 읽을 수 있는 수준에서 W. D. 라이트와 J. 길드의 실험이 어떻게 'CIE 1931 착색법'으로 이어지는지 설명하겠습니다.

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