

식품의 색소에 관한 기본 이론 (색소 측정방법 및 해석방법 포함)

신 동 훈
(고려대 식량공학과)

I. 눈과 색채시력

색깔을 구별하는 눈의 역할은 눈의 해부적인 구조, 생화학 및 신경생리학과 연관이 있다. 어떤 물체로부터의 광선은 눈의 각막을 통하여 접수되어 수양액, 수정체, 유리체액을 통과한 후 망막의 작은 일부분에 초점이 맞추어진다.

눈 내부의 대부분을 점하고 있는 망막은 여러 층으로 형성되어 있다. 광선은 빛에 민감한 간상 및 원추세포에 부딪치기 전에 신경조직과 혈관 층을 통과하여 먼저 망막에 부딪치게 된다. 망막의 foveal pit로 알려진 지역에는 신경조직이 매우 가늘고, 혈관들은 존재하지 않으며, 빛에 민감한 세포들이 매우 빽빽이 채워져 있다. 이러한 요인들이 망막 foveal pit 부분의 시각 활동을 가장 크게 해준다(그림 1).

망막 내부에는 빛에 민감한 두 종류의 세포인 간상체와 원추체가 있다. 사람의 눈에는 약 100,000,000개의 간상체와 7,000,000개의 원추체가 존재한다. 망막의 foveal pit 부분에는 간상체들이 존재하지 않지만 그러나, 이 부분의 바깥쪽으로부터는 망막의 단위면적당 간상체의 수가 원추체가 존재하지 않는 망막의 외부의 가장자리 끝까지 원추체의 수에 비례하여 증가한다.

원추체들은 foveal pit에 고농도로 존재하기 때문에 색깔을 판별하고 뚜렷한 상을 나타내는데

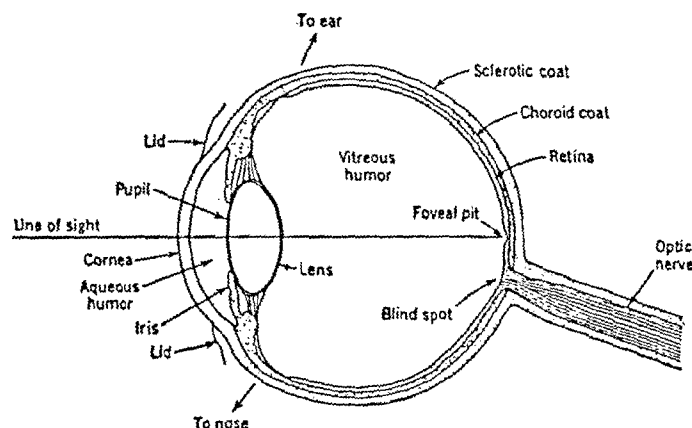


그림 1. Sketch of a horizontal cross section of the human eye.

관련되고 있다. 간상체들은 색채는 인식하지 못하지만, 백, 흑 및 회색 같은 광선의 명암도의 인식에 관계한다. 더욱이, 간상체들은 신경세포들에 의하여 다발로 연결되어 있어, 민감도는 향상시켜 주지만 미세한 부분을 보는 데는 방해가 된다.

색깔을 감지하는 세 종류의 원추세포가 있는데 각 원추세포들은 빛의 서로 다른 파장에 특정한 민감도를 가진다. 즉, 청색에 반응하는 원추체(cyanopsin)는 440~445 nm, 녹색에 반응하는 원추체(iodopsin)는 525~535 nm, 적색에 반응하는 원추체(porphyrpsin)는 560~570 nm에서 최대흡수 파장을 나타낸다(그림 2).

이러한 세포들은 서로 다른 광선에 반응하는 색소들을 함유하기 때문에 서로 다른 광선에 대한 반응도를 나타내게 된다. 이 색소들은 11-cis-retinene(11-cis-retinal, V-A)과 단백질의 두 부분으로 구성되어 있으며, 세 가지의 색소들은 모두 11-cis-retinene을 소유하지만 단백질들은 서로 형태가 다르다. 이 단백질들을 opsin이라 하는데, opsin들의 차이점에 따라서 부착된 11-cis-retinene에 서로 다른 최대흡수파장을 부여하는 기능을 갖는다.

11-cis-retinene은 단백질의 amine기와 retinene의 aldehyde기의 반응을 통하여 Schiff 염기를 형성함으로써 opsin 단백질에 부착되어져 있다고 여겨진다.

이러한 색소들이 광선을 흡수할 때, 11-cis-retinene은 trans-retinene으로 전환되고 이러한 구조적인 변화가 신경신호를 시작시키는 것으로 여겨진다. 그 후에 모든 trans-retinene은 11-cis-retinene으로 전환되고 다음에는 opsin과 함께 본래의 광선에 반응하는 색소를 다시 만든다(그림 3).

원추세포에 의한 자극들은 신경을 통하여 뇌로 전달된다. 명암도의 감각 또한 보통의 조명조건 하에서는 원추세포들에 의하여 전달된다. 광선의 파장과 명암의 인식간의 정상적인 관계는 여러 광선들이 같은 밝기로 보이게 될 때까지 정상시력을 가진 사람들이 일련의 단색 광선들의 세기에 적응하는 데서 얻어질 수 있다. 적응된 광선의 세기로부터 동등한 명암도 인식을 주는 상대적인 힘을 얻을 수 있다. 이러한 평가는 보통 서로 다른 파장의 동등한 세기의 광선의 상대적인 명암도를

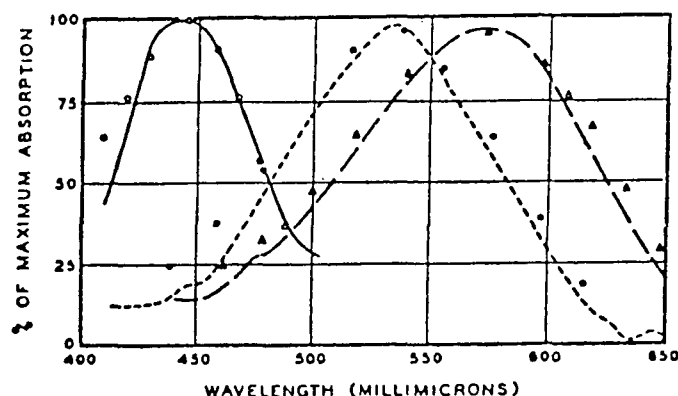


그림 2. Average relative absorbance difference spectra of the three cones whose individual spectra are shown in Fig. 10. The large open and filled circles and the triangles are calculated for hypothetical pigments based upon rhodopsin and obeying Dartnall's principle. (From MacNichol, 1964b)

나타낼 수 있도록 숫자로 전환된다. 원추세포에 있어 광선의 단위세기당 최대 평균 명암도는 파장 555 nm에서 얻어지며, 이 수치는 명암도의 인식이 적색 및 녹색에 반응하는 원추세포들의 광화학적

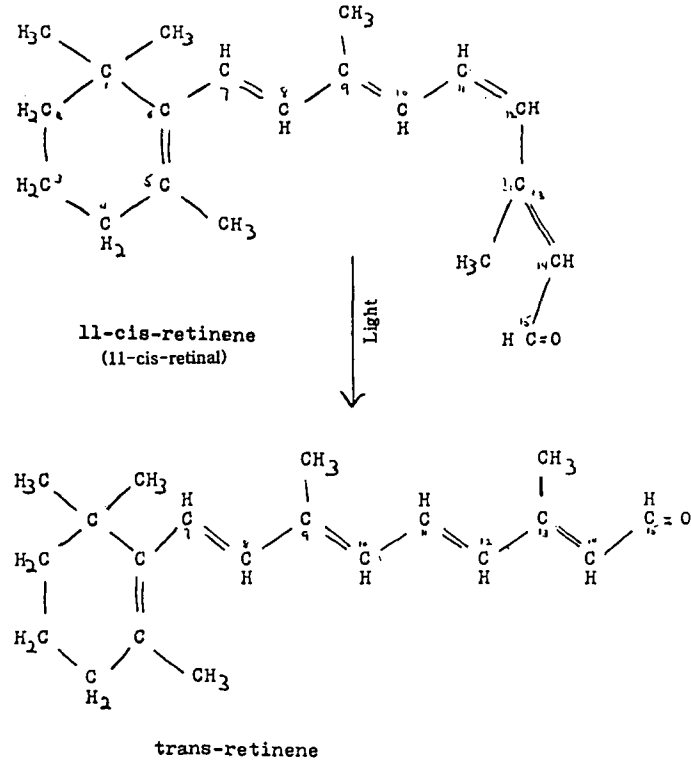


그림 3.

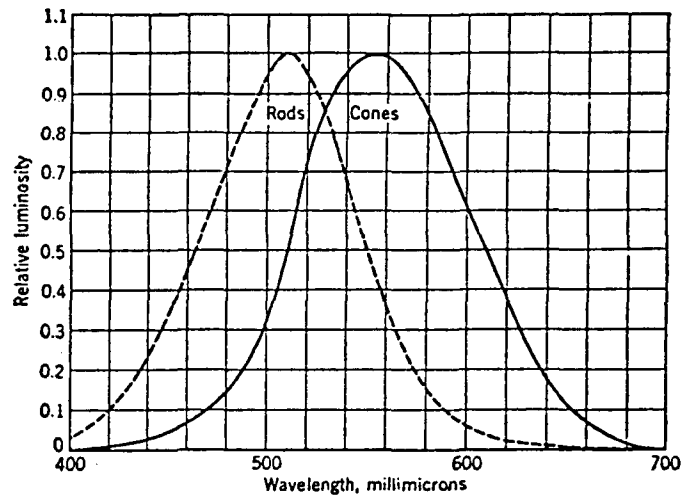


그림 4. Relative spectral sensitivities of the rods and cones. Rod vision (dotted curve) serves us in very dim light such as sturlight; cone vision (solid curve), in daylight. The solid refers only to the light-dark aspect of daylight vision and is called the relative luminosity curve.

Wald cycle (광수용체 세포에서의 V-A의 기능)

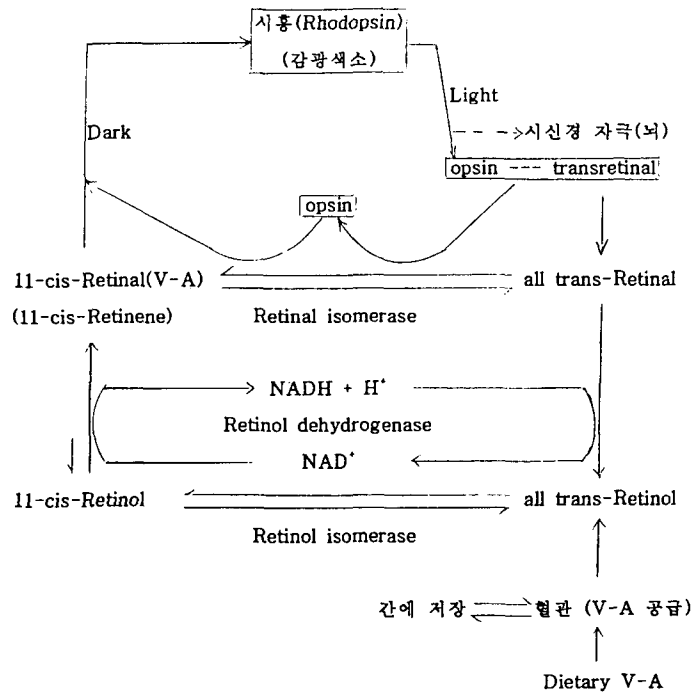


그림 5.

반응으로부터 유래됨을 암시한다(그림 4).

간상세포들은 오직 이 세포들이 활동하는 특정조건 하에서만 명암도를 인식한다. 간상세포 모두는 광화학 반응 후에 매우 서서히 재생되는 같은 시각 색소인 시홍(rhodopsin)을 갖고 있다. 따라서, 매우 어두운 조명 하에서 약 30분 정도 지나면 간상세포를 매개로 하는 시력에 의하여 효과적으로 물체의 형태와 명암도를 인식할 수 있을 정도의 광선에 반응하는 형태로 시홍 색소의 양이 존재한다 (그림 5).

II. 광선과 색깔

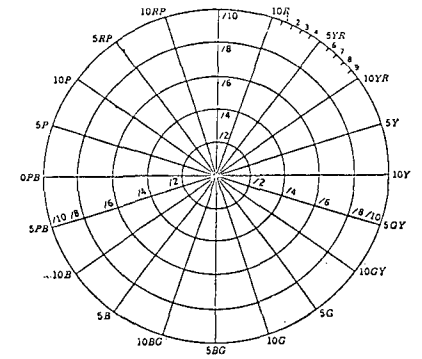
우리가 인식하는 물체의 색깔은 주로 그 물체에서 발생하는 빛의 성질에 의하여 결정되어진다. 광선은 파장과 주파수를 가진 광자 단위들로 구성되어 있으며, 진공 상태에서는 모든 광자들은 초속 $2.998 \times 10^8 \text{m}$ 의 속도를 가진다.

(1) $c = \lambda v = 2.998 \times 10^8 \text{ m/second}$

λ : 파장(m), v : 주파수(진동수/초)

(2) $E = h\lambda = hc/\lambda = \text{Joules}$

E : 광에너지, h : Planck 상수 $6.626 \times 10^{-34} \text{ Joule seconds}$



Organization of the colors of constant Munsell value in the Munsell Book of Color.

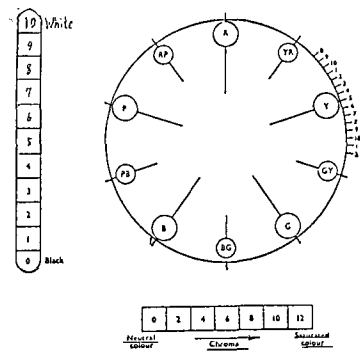


그림 6. Heu, value, and *chroma* co-ordinates of the Munsell system

방정식 (2)는 파장이 짧을수록 광자에 의하여 보유 되는 에너지의 양이 더욱 커짐을 나타낸다. 예를 들면, X선은 파장이 매우 짧기 때문에 X선 광자는 상당한 양의 에너지를 지닌다.

인간의 시력은 가시광선 영역인 350 nm~750 nm의 비교적 좁은 파장 영역을 이용한다. 자외선 (UV) 영역은 가시광선 영역보다 파장이 짧고, 적외선(IR) 영역은 가시광선 영역보다 파장이 길다.

분광의 파장(nm)	인식되는 색깔
380-450	보라색
450-490	파란색
490-560	초록색
560-590	노란색
590-630	주황색
630-760	빨간색

III. 색깔의 분류와 측정법

1. Munsell 체계(그림 6)

색상(hue) ; 1~10

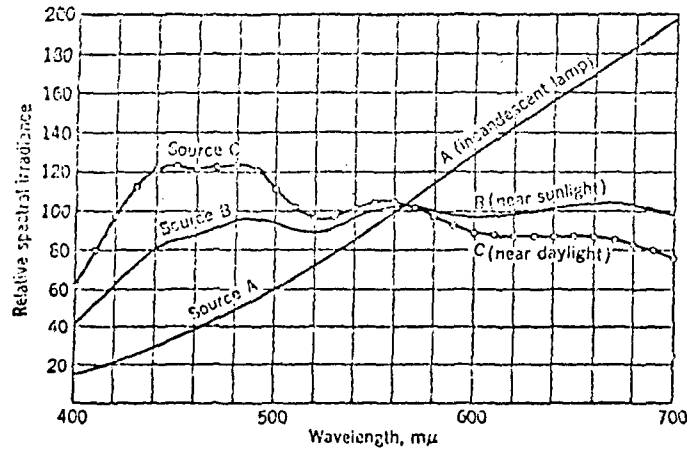


그림 7. Relative spectral irradiances from standard sources A, B, and C. Source A is typical of the gas-filled incandescent lamp; source B, of noon sunlight; and source C, of average daylight.

명암도(value, lightness) : 0(black)~10(white)

색채도(chroma, saturation) : 0(흐림)~10(맑음)

예 : 5G 3/7 색상=5 Green(중간치)

명암도= 3/

색채도=7

Munsell hue(색상) (명암도=5)	우세한 파장 (발광체 C*)	Munsell hue(색상) (명암도=5)	우세한 파장 (발광체 C*)
5 Purple blue	472 nm	5 Yellow	577 nm
5 Blue	482 nm	5 Yellow red	590 nm
5 Blue green	491 nm	5 Red	650 nm
5 Green	504 nm	5 Red purple	501 nm
5 Green yellow	564 nm	5 Purple	561 nm

*발광체 C : 흐린 일광 ; $x=.3101$, $y=.3163$ (그림 7)

2. C.I.E.체계(Commission International de l'Eclairage-International Commission on Illumination System)

모든 색깔은 빨간색, 초록색과 푸른색의 세 종류의 기본 색을 적당하게 배합함으로써 재현할 수 있다는 원칙에 따른다. 이상의 기본 색들의 기준으로는 파장 700 nm의 빨간색(R), 546.1 nm의 초록색(G)과 435.8 nm의 파란색(B)을 1 : 4.597 : 0.0601의 강도비율로 혼합할 때 백색 광을 형성하는

表 1 1931 CIE Standard Observer for Colorimetry

Wave-length, m μ	Tristimulus Values of Equal-Energy Spectrum			Wave-length, m μ	Tristimulus Values of Equal-Energy Spectrum		
	\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ		\bar{x}_λ	\bar{y}_λ	\bar{z}_λ
380	0.0014	0.0000	0.0065	580	0.9163	0.8700	0.0017
385	.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	.8163	.0014
390	.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	.7570	.0011
395	.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	.6949	.0010
400	.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	.6310	.0008
405	.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	.5663	.0006
410	.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	.5030	.0003
415	.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	.4412	.0002
420	.1344	0.0040	0.6456	620	0.8544	.3810	.0002
425	.2143	0.0073	1.0391	625	0.7514	.3210	.0001
430	.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	.2650	.0000
435	.3285	0.0168	1.6230	635	0.5419	.2170	.0000
440	.3483	0.0230	1.7471	640	0.4479	.1750	.0000
445	.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	.1382	.0000
450	.3362	0.0380	1.7721	650	0.2835	.1070	.0000
455	.3187	0.0480	1.7441	655	0.2187	.0816	.0000
460	.2908	0.0600	1.6692	660	0.1649	.0610	.0000
465	.2511	0.0739	1.5281	665	0.1212	.0446	.0000
470	.1954	0.0910	1.2876	670	0.0874	.0320	.0000
475	.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	.0232	.0000
480	.0956	0.1390	0.8130	680	0.0468	.0170	.0000
485	.0580	0.1693	0.6162	685	0.0329	.0119	.0000
490	.0320	0.2080	0.4652	690	0.0227	.0082	.0000
495	.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	.0057	.0000
500	.0049	0.3230	0.2720	700	0.0114	.0041	.0000
505	.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	.0029	.0000
510	.0003	0.5030	0.1582	710	0.0058	.0021	.0000
515	.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	.0015	.0000
520	.0633	0.7100	0.0782	720	0.0029	.0010	.0000
525	.1096	0.7932	0.0573	725	0.0020	.0007	.0000
530	.1655	0.8620	0.0422	730	0.0014	.0005	.0000
535	.2257	0.9149	0.0298	735	0.0010	.0004	.0000
540	.2904	0.9540	0.0203	740	0.0007	.0003	.0000
545	.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	.0002	.0000
550	.4334	0.9950	0.0087	750	0.0003	.0001	.0000
555	.5121	1.0002	0.0057	755	0.0002	.0001	.0000
560	.5945	0.9950	0.0039	760	0.0002	.0001	.0000
565	.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	.0000	.0000
570	.7621	0.9530	0.0021	770	0.0001	.0000	.0000
575	.8425	0.9153	0.0018	775	0.0000	.0000	.0000
580	.9163	0.8700	0.0017	780	0.0000	.0000	.0000
Totals					21.3713	21.3714	21.3715

사실에 입각하여 이상의 강도비율의 단파장의 광선을 기본 색으로 하고 있다.

어떤 임의의 색깔의 빨간색, 초록색과 파란색의 비율 x, y, z 는 다음과 같은 식으로 표시될 수 있으며, 이를 그 색깔의 삼자극치(tristimulus values of the color)라고 한다.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} ; y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

1) 빛의 삼원색의 삼자극치(1931 CIE 체계 색도표 참조)(표 1)

파장(nm)	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
400	.0143	.0004	.0679
470	.1954	.0910	1.2876
530	.1655	.8620	.0422
575	.8425	.9154	.0018
610	1.0026	.5030	.0003
700	.0114	.0041	.0000
	$\Sigma\bar{x}=X$	$\Sigma\bar{y}=Y$	$\Sigma\bar{z}=Z$

X=가장 선명한 적자색

Y=파장 520 nm의 분광색보다 밝은 초록색 및 명암도의 기능

Z=파장 477 nm의 분광색보다 밝은 파란색

2) 분광 색의 색도 좌표

파장(nm)	\bar{x}	색도좌표		
		\bar{y}	\bar{z}	
400	.1733	.0048	.8219	보라색
470	.1241	.0578	.8181	파란색
530	.1547	.8059	.0394	초록색
575	.4788	.5202	.0019	노란색
610	.6658	.3340	.0002	주황색
700	.7347	.2653	.0000	빨간색

$$x + y + z = 1$$

$$\text{즉, } x = \frac{X}{X+Y+Z} ; y = \frac{Y}{X+Y+Z} ; z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

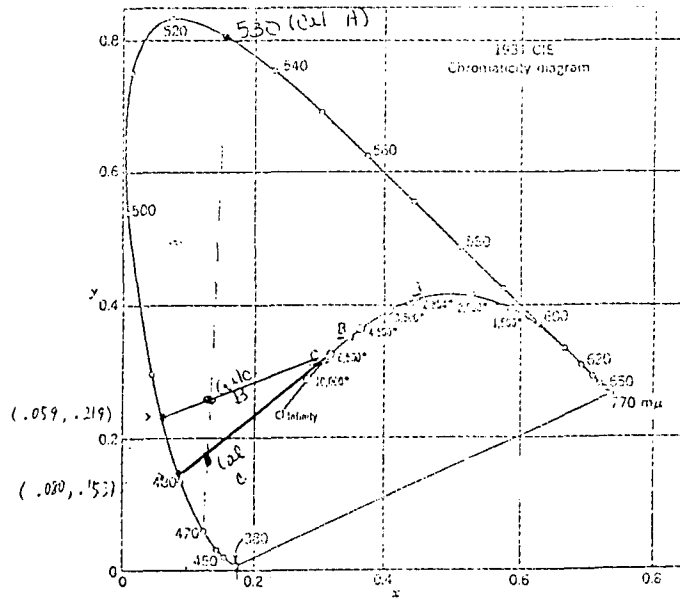


그림 8. CIE chromato

IV. 색도 좌표 계산법

A. 분광(파장 530 nm) 색깔의 색도 좌표의 계산(그림 8)

1. 파장 530 nm에서의 동등한 에너지 분광의 삼자극치를 찾음(1931 CIE 체계 색도표를 사용)(표

1)

$$\bar{x} = .1655 = X$$

$$\bar{y} = .8620 = Y$$

$$\bar{z} = .0422 = Z$$

2. $\bar{x} + \bar{y} + \bar{z} = 1.0697 = X + Y + Z$

3. $x = \frac{.1655}{1.0697} = .1547$

$$y = \frac{.8620}{1.0697} = .8059$$

$$z = \frac{.0422}{1.0697} = .0394$$

$$x + y + z = 1$$

B. 두 개의 분광색 전등의 혼합된 색깔의 색도 좌표의 계산(그림 8)

분광 전등의 파장(nm)	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}	watts
470	.1954	.0910	1.2876	2
530	.1655	.8620	.0422	1
\bar{x} , \bar{y} 및 \bar{z} 에 watt수를 곱해 줌				
	\underline{X}	\underline{Y}	\underline{Z}	
470	.3908	.1820	2.5752	
530	.1655	.8620	.0422	
합계	.5563	1.0440	2.6174	

$$X+Y+Z=4.2177$$

$$x=.1319$$

$$y=.2475 \quad \rightarrow \text{파장 } 486 \text{ nm(색상 위치도표 참조)}$$

$$z=.6206$$

$$x+y+z=1$$

C. 물체로부터 반사된 광선의 색도 좌표의 계산(그림 8)

B의 두 전등이 두 분광을 서로 다르게 반사시키는 물체에 비치게 할 경우 물체로부터 반사된 광선의 색도 좌표를 계산할 수 있음.

분광 전등의 파장 (nm)	%	반사된 광선		
		반사율	\underline{X}	\underline{Y}
470	50	.1954	.0910	1.2876
530	30	.0500	.2586	.0127
		.2454	.3496	1.3003

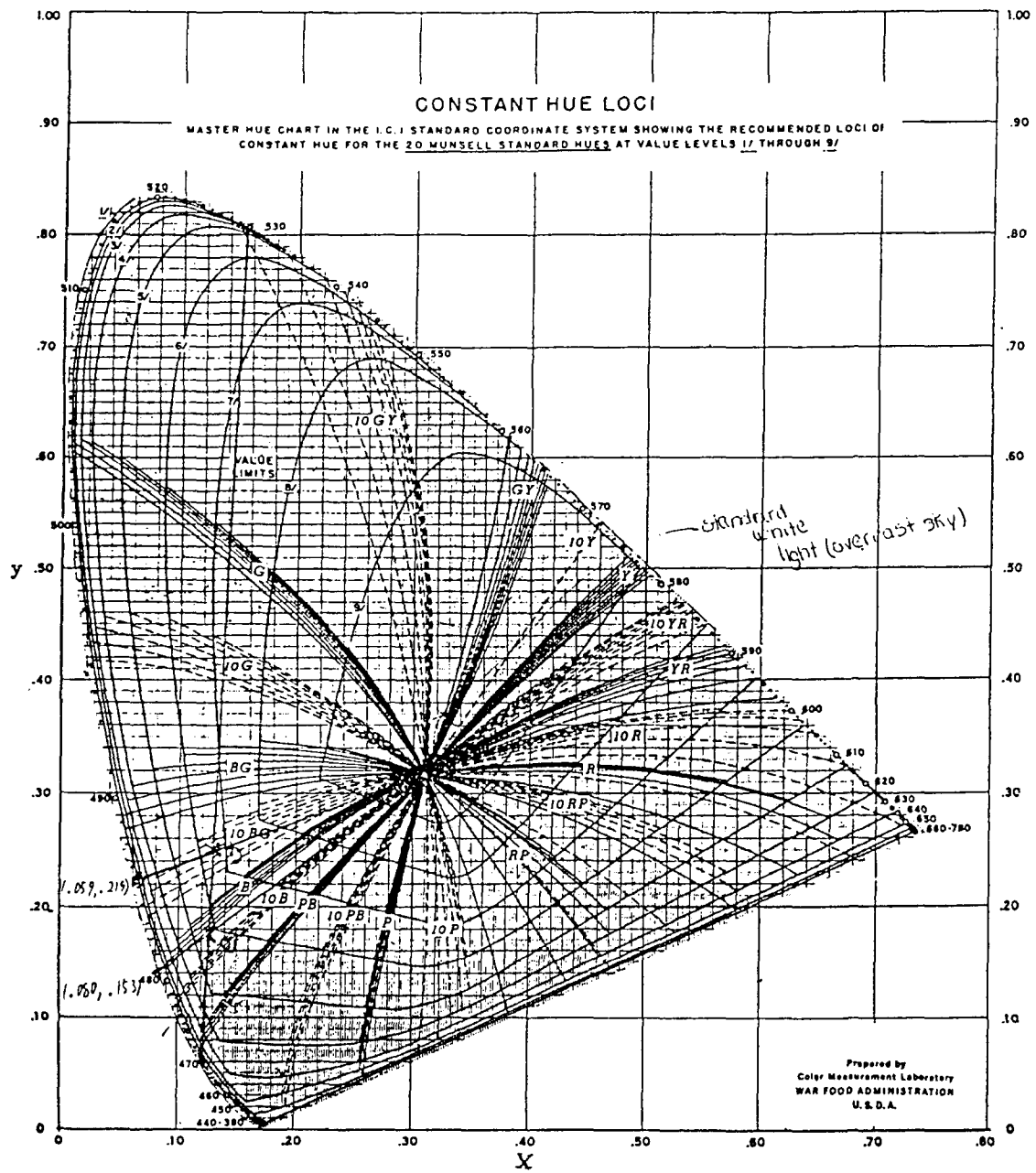
$$X+Y+Z=1.895$$

$$x = \frac{.2454}{1.895} = .1295$$

$$y = \frac{.3496}{1.895} = .1845 \quad \rightarrow \text{파장 } 481.5 \text{ nm(색상 위치도표 참조)}$$

$$z = \frac{1.3003}{1.895} = .6860$$

$$x+y+z=1$$



FROM "FINAL REPORT OF THE U. S. A. SUBCOMMITTEE ON THE SPACING OF THE MUNSELL COLORS," (J. OPT. SOC. AM. 33, 385-418, 1943)

D. 우세한 파장의 평가(그림 9)

첫째로 색도 좌표들을 C.I.E.(I.C.I.) 색상 위치도표에 설정한 후에 설정된 꼭지점과 발광체의 위치까지 직선을 긋는다. 보통 발광체 C(흐린 일광 ; x=.3101, y=.3163)가 사용된다(그림 7). 이 색깔 위치의 꼭지점을 지나서 만나는 분광 색깔 위치 곡선과의 교차점이 설정된 색깔의 우세한 파장이 된다.

즉, B의 색깔-우세한 파장=486 nm
 C의 색깔-우세한 파장=481.5 nm

E. 색채도의 % 포화도(선명도)의 평가(그림 9)

% 포화도는 색상 위치도표에 있어서 발광체의 위치로부터 설정된 색도 좌표까지의 거리를 발광체의 위치로부터 우세한 파장의 색깔 위치까지의 거리로 나누어 준 값에 100을 곱한 값으로 정의된다.

색깔 B:

발광체 C로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 35.5 mm
 발광체 C로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 50 mm

$$\% \text{ 포화도} = \frac{35.5}{50} \times 100 = 71\% (7.1/10 : \text{비교적 맑음, 선명함})$$

색깔 C :

발광체 C로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 42.5 mm
 발광체 C로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 53 mm

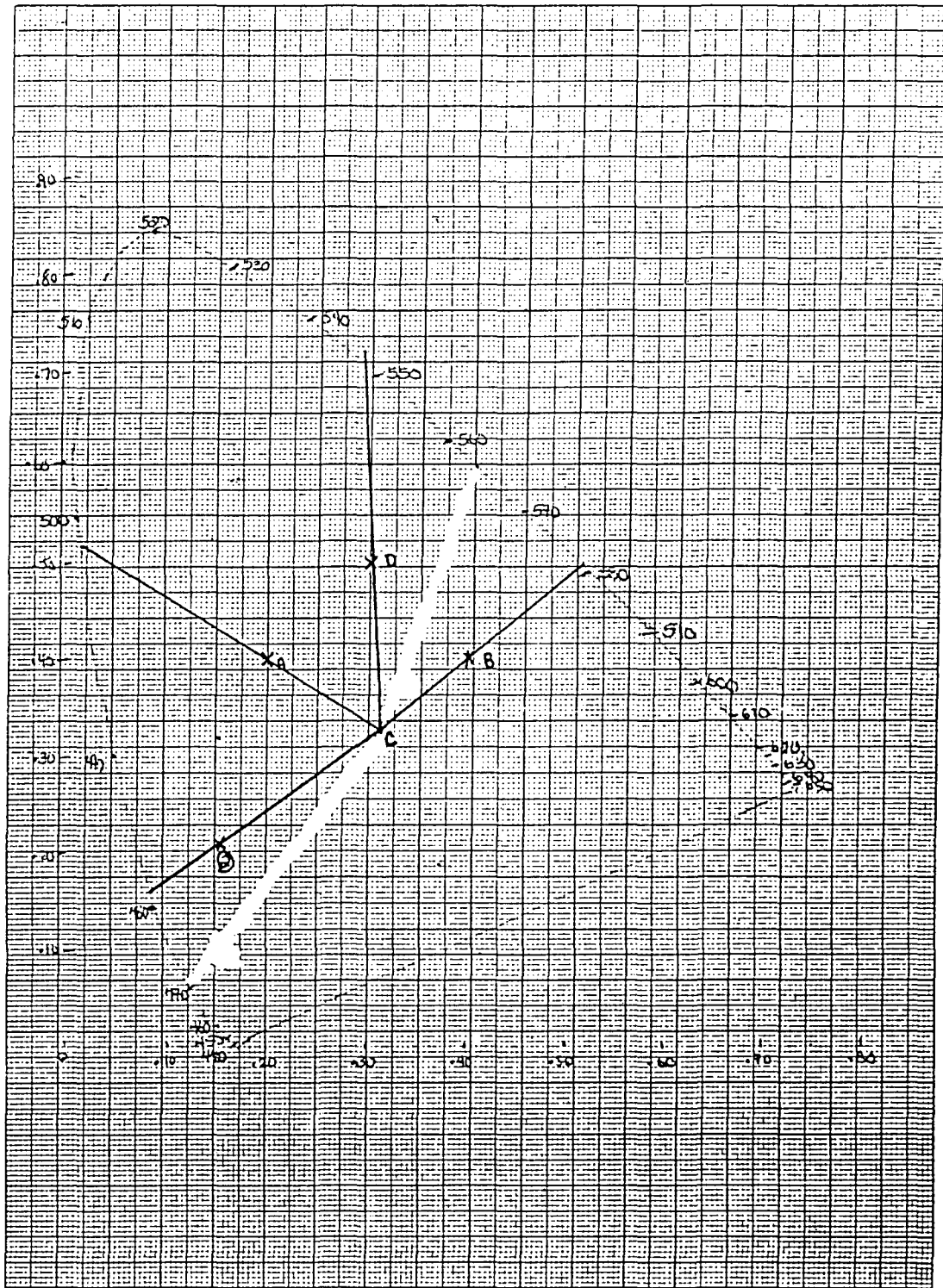
$$\% \text{ 포화도} = \frac{42.5}{53} \times 100 = 80\% (8.0/10 : \text{비교적 맑음, 선명함})$$

**발광체 C의 x 및 y좌표를 이용한 계산법(그림 7, 9)

	좌표	
	\bar{x}	\bar{y}
발광체 C	.3101	.3163
파장 486 nm의 분광	.059	.219
파장 481.5 nm의 분광	.080	.153

색깔 B의 % 포화도 :

$$x\text{좌표에 의한 계산} = \frac{.3101 - .1319}{.3101 - .059} \times 100 = 71\%$$



$$y\text{좌표에 의한 계산} = \frac{3163 - .2475}{.3163 - .219} \times 100 = 71\%$$

색깔 C의 % 포화도 :

$$x\text{좌표에 의한 계산} = \frac{3101 - .1295}{.3101 - .080} \times 100 = 79\%$$

$$y\text{좌표에 의한 계산} = \frac{.3163 - .1845}{.3163 - .153} \times 100 = 81\%$$

예제 1. 파장이 각각 475 nm, 500 nm, 540 nm, 580 nm, 610 nm인 5전등을 화면의 서로 다른 부분에 비추었을 때 단위 면적당 모두 동일한 반사율을 나타냈다. 이 때 어느 분광이 가장 큰 정도의 빨간색, 명암도, 파란색을 가진 것으로 인식되어 지는 이유는? (C. I. E. 체계 색도표 이용)

파장	삼 자 극 치		
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}
475 nm	.1421	.1126	1.0419
500 nm	.0049	.3230	.2720
540 nm	.2904	.9540	.0203
580 nm	.9163	.8700	.0017
610 nm	1.0026	.5030	.0003

*빨간색의 정도는 x좌표에 의하여 결정되어지므로 x좌표의 값이 가장 큰 파장 610 nm 분광의 빨간 정도가 가장 크다.

*파란색의 정도는 z좌표에 의하여 결정되어지므로 z좌표의 값이 가장 큰 파장 475 nm의 분광의 파란 정도가 가장 크다.

*명암도는 y좌표에 의하여 결정되어지므로 y좌표의 값이 가장 큰 파장 540 nm의 분광의 명암도가 가장 크다.

예제 2. 파장이 각각 430 nm, 465 nm, 530 nm인 3전등을 이상적으로 반사되는 화면에 동시에 비추어 줄 경우에 각각 1 watt/m²의 강도로 화면에 부딪쳐서 보는 사람(혹은 기기)에 의하여 0.002%의 반사율로 인식 된다. 이 경우에 있어서의 색도 좌표를 계산하고, 이 색깔을 C. I. E. 색상 도표에서의 위치는? (그림 10)

파 장	삼 자 극 치			watt	반 사 율
	\bar{x}	\bar{y}	\bar{z}		
430 nm	.2839	.0116	1.3856	1	2×10^{-5}

465 nm	.2511	.0739	1.5281	1	2×10^{-5}
530 nm	.1655	.8620	.0422	1	2×10^{-5}
합 계	.7005	.9475	2.9559		

$$X = (.7005)(2 \times 10^{-5}) = 1.401 \times 10^{-5}$$

$$Y = (.9475)(2 \times 10^{-5}) = 1.895 \times 10^{-5}$$

$$Z = (2.9559)(2 \times 10^{-5}) = 5.9118 \times 10^{-5}$$

$$X + Y + Z = 9.2078 \times 10^{-5}$$

$$x = 1.401 \times 10^{-5} / 9.2078 \times 10^{-5} = .1521$$

$$y = 1.895 \times 10^{-5} / 9.2078 \times 10^{-5} = .2058$$

$$z = 5.9118 \times 10^{-5} / 9.2078 \times 10^{-5} = .6421$$

$$x + y + z = 1$$

발광체 C의 위치로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 37.5 mm

발광체 C의 위치로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 54 mm

$$\text{색채도의 \% 포화도(선명도)} = \frac{37.5}{54} \times 100 = 69.44\% (6.9/10 : \text{비교적 맑음})$$

우세한 파장 : 약 481 nm

Munsell 색상(hue) : 5B=5 Blue(중간치)

예제 3. 다음의 색깔들의 % 포화도(선명도), 우세한 파장 및 근사치의 Munsell hue(색상)은? 발광체 C(흐린 일광)일 경우에 명암도가 가장 큰 색깔은? (그림 10)

A. $x = .20$ $y = .40$ $Y = 25$

B. $x = .40$ $y = .40$ $Y = 15$

D. $x = .30$ $y = .50$ $Y = 20$

A. 우세한 파장 = 499 nm

Munsell hue(색상) = 5G = 5 Green

발광체 C로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 26.5 mm

발광체 C로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 68 mm

$$\% \text{ 포화도} = 26.5/68 \times 100 = 38.97\% (3.9/10 : \text{비교적 흐림})$$

B. 우세한 파장 = 579 nm

Munsell hue = 5Y = 5 Yellow

발광체 C로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 22 mm

발광체 C로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 50 mm

$$\% \text{ 포화도} = 22/50 \times 100 = 44.0\% (4.4/10 : \text{중간정도 선명함})$$

D. 우세한 파장=548 nm

Munsell hue=9GY=9 Green yellow

발광체 C로부터 설정된 색깔까지의 거리 : 32.5 mm

발광체 C로부터 분광의 색깔까지의 거리 : 71 mm

% 포화도= $32.5/71 \times 100 = 45.77\%$ (4.6/10 : 중간정도 선명함)

*우세한 파장 499 nm을 가진 색깔이 Y값이 가장 크므로 가장 밝다.