光源의 色測定에 대한 IES指針 解說

李 鎭 雨
〈(株) 세명백트론 硏究室長·工博〉

1. 서 언

램프의 색특성을 평가하는데에는 다음 두 가지 요소가 고려되어야 한다.

(1) 광원의 외관상 색(붉은색 혹은 푸른색인가?)

(2) 연색성(표준광원 하에서의 나타나는 것과 비교한 물체의 보임에 대한 광원의 영향)

광원의 색특성은 여러가지 방법으로 결정되는데 다음에서 이러한 지침을 논의하겠다. 광원의 연색성을 평가하는 한가지 방법은(이 지침에서는 다루지 않는다.) CIE에서 간행한 Method of Measuring and Specifying Color Rendering Properties of Light Sources와 IES Lighting Handbook에서 다루고 있다.

2. 광원의 색

2.1 대의

광원의 색을 지각하는 것은 조도, 형태 및 시간의 변화와 별개의 문제이다. 대신 이것은 광원으로부터 나오는 광속의 상대적인 분광분포(Spectral Power Distribution ; SPD)와 관측자의 순응에 따른다. 두개의 광원은 동일한 색을 연출하지만 전혀 다른 상대분광분포를 갖는 경우도 있다.(즉, 다른 성질의 조합으로 만들 수 있다.) 그러나 두 광원이 동일한 상대분광분포를 갖는 경우, 이들 광원은 동일하게 색을 연출하는 등 모든 다른 요인들을 동일하게 한다.

광원의 색을 측정하는데에 일반적으로 CIE 1931표준 색관측 관측자함수(Standard Colorimetric Observer Functions)를 이용한다.(1964년에 4도 이상의 시각 범위에 대한 표준이 보충되었으나 이것은 실제로 거의 사용되지 않으므로 이 지침에서 다루지는 않겠다.) 대개 '색'은 3자극값(X, Y, Z) 혹은 색도좌표(Chromaticity Coordinates) (x, y)로 나타낸다. 색은 색도가 흑체 궤적과 만나면 색온도로 표현하며 만나지 않으면 상관 색온도로 나타낸다.

2.2 광원색의 측정

광원 색도의 기본적인 결정은 스펙트럼측정에 의한다. 여기에서 광원의 SPD가 측정되고 색도가 계산된다. 또한 스펙트럼측정 곡선이 측정되면 색도가 계산된다. 스펙트럼측정 곡선은 색도, 색온도, 연색성 및 광원의 심리적 영향을 결정하는 기본이 된다.

광원의 색측정은 교정된 광전색측정기(Photoelectric Colorimeter)나 시감3자극색측정기

(Visual tristimulus Colorimeter)를 사용하여(계산과정 없이)직접 행할 수 있다.

3. CIE 색특성 시스템

1931년 CIE에 의하여 처음 추천된 색특성 시스템은 주어진 세개의 가상 기준색 X, Y, Z의 양에 의하여 정의되는데, 이러한 가상 기준색은 표준 관찰자가 측정 광원을 구별하는데 요구된다. 이러한 양은 광원의 방사의 스펙트럼 조합과 색조합함수(Color matching Functions)의 합을 취하여 계산한다.(그림1 참조) 예를 들면,

$$X=K\sum_{\lambda=380}^{\lambda=780}S(\lambda)\bar{x}(\lambda)\triangle\lambda$$

여기에서

$S(\lambda)$=광원의 SPD

K=규격화 인수

$\bar{x}(\lambda)$=색조합함수 값, 그림1과 표1에서 얻는다.

Y와 Z에서도 비슷하게 표현하는데 $\bar{x}(\lambda)$ 대신 $\bar{y}(\lambda)$와 $\bar{z}(\lambda)$로 대체한다.

규격화 인수 K는 어떠한 경우에 적용하더라도 일정한 임의의 값으로 정할 수 있다.

S(λ)의 값이 절대값(즉, W단위로)으로 주어지는 특별한 경우 다음과 같이 K를 정하는 것이 편리하다.

$$K=K_m=683[lm/W]$$

위에 의하여, Y의 값은 자극을 일으키는 광속이 루우멘 단위로 주어진다. 여기에서 S(λ)에 사용하는 기호는 λ이다.

X, Y, Z의 값은 3자극값이라 하며, 색도와 SPD의 조도의 명확한 특성을 구성한다. 이것으로부터 색도 좌표가 다음의 공식으로 계산된다.

$$x=\frac{X}{X+Y+Z}$$

$$y=\frac{Y}{X+Y+Z}$$

$$z=\frac{Z}{X+Y+Z}$$

이 좌표 중에서 어느 두개만 알면 나머지를 결정할 수 있다. 이들 관계는 다음과 같다.

$$x+y+z=1$$

따라서 이들 중 두개만을 2차원 색도도의 좌표축으로 사용할 수 있다. 일반적으로 사용하는 쌍은 x와 y이다. 그림2에 1931 CIE색도도를 나타내었다. 모든 실제 색은 대략 삼각형 모양으로 나타나는 도형 내부의 좌표로 나타난

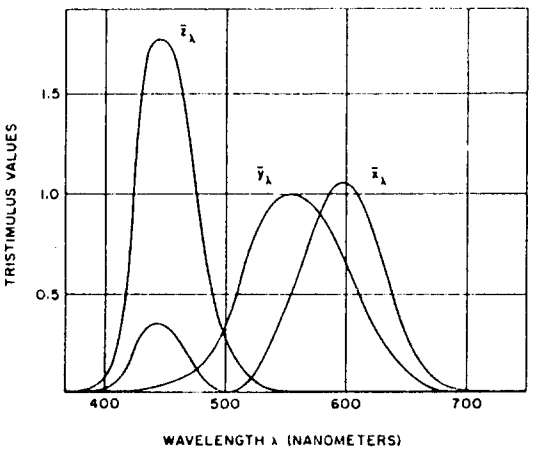

그림1. 1931 CIE 표준광에 근거한 색조합함수

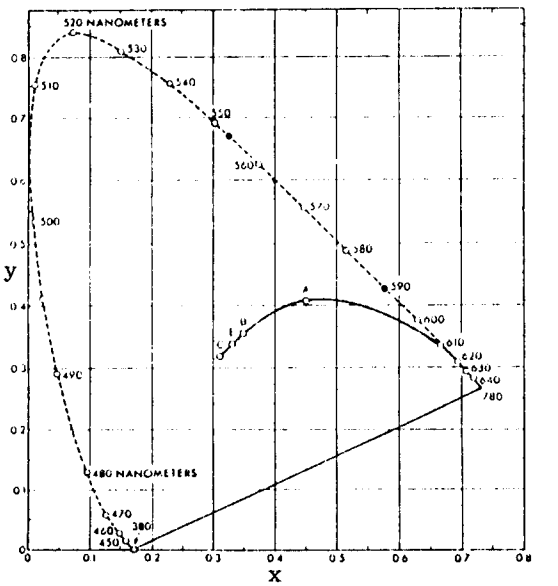

그림2. CIE x, y 색도도

다. 개개의 스펙트럼 파장은 도형의 곡선부분에 대응되는 반면, 직선부분은 가시 스펙트럼 양 끝 파장의 혼합에 의하여 형성되는 것에 주목할 필요가 있다.

그림2의 도형은 몇 가지 유용한 특징을 가지고 있다. 표적색 색도가 하나의 점으로 표시될 수 있으며, 그 주위의 허용 편차가 원 혹은 다른 도형으로 나타날 수 있다.

다른 유용한 특징은 어떠한 두 색의 빛을 혼합한 빛은 그들의 색도도 상의 점을 잇는 직선 위에 위치하게 된다는 점이다.(그림 3)

도형의 가장 유용한 특징은 색도도가 전세계적으로 알려져 있으며 세계의 모든 곳에서 사용한다는 것이다. 이외에도 이 도형과 관계되는 여러가지 다른 유용한 계산상의 성질이 있다. 커다란 단점은 색도도 상의 동일한 거리가 지각되는 색의 차이를 동일하게 나타내지 못한다는 것이다. 합성된 도형은 타원형이 되는데, 이러한 타원의 크기, 모양과 방향은 도형 내의 위치에 따라 크게 변한다.

어떠한 2차원 평면도 완전히 균일하게 인지되는 색의 차이를 나타낼 수 없으나, 그러한 도형의 유용함은 실제 목적에 충분히 사용가능

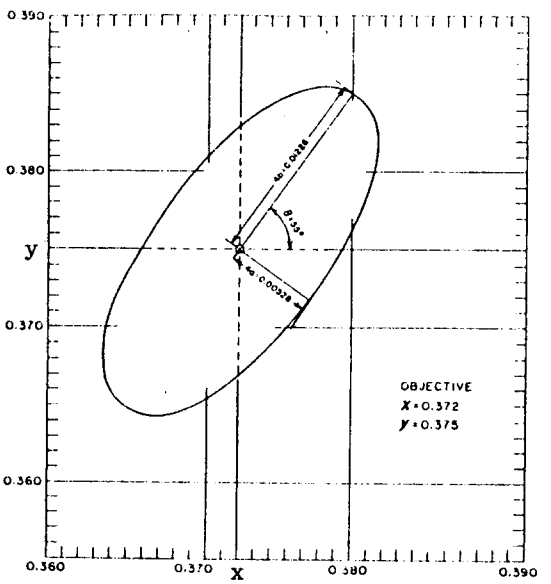

그림3. Mac-Adam 색단계 : 40W, T-12 냉백색 형광램프의 색좌표.

표 1. 균일 스펙트럼 출력 광원에 대한 스펙트럼의 3자극값(CIE 1931 Standard Observer)

Wavelength (nanometer)	$\bar{x}(\lambda)$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$	Wavelength (nanometer)	$\bar{x}\lambda$	$\bar{y}(\lambda)$	$\bar{z}(\lambda)$
380	0.0014	0.0000	0.0065	580	0.9163	0.8700	0.0017
385	0.0022	0.0001	0.0105	585	0.9786	0.8163	0.0014
390	0.0042	0.0001	0.0201	590	1.0263	0.7570	0.0011
395	0.0076	0.0002	0.0362	595	1.0567	0.6949	0.0010
400	0.0143	0.0004	0.0679	600	1.0622	0.6310	0.0008
405	0.0232	0.0006	0.1102	605	1.0456	0.5668	0.0006
410	0.0435	0.0012	0.2074	610	1.0026	0.5030	0.0003
415	0.0776	0.0022	0.3713	615	0.9384	0.4412	0.0002
420	0.1344	0.0040	0.6456	620	0.8544	0.3810	0.0002
425	0.2148	0.0073	1.0391	625	0.7514	0.3210	0.0001
430	0.2839	0.0116	1.3856	630	0.6424	0.2650	0.0000
435	0.3285	0.0168	1.6230	635	0.5419	0.2170	0.0000
440	0.3483	0.0230	1.7471	640	0.4479	0.1750	0.0000
445	0.3481	0.0298	1.7826	645	0.3608	0.1382	0.0000
450	0.3362	0.0380	1.7721	650	0.2835	0.1070	0.0000
455	0.3187	0.0480	1.7441	655	0.2187	0.0816	0.0000
460	0.2908	0.0600	1.6692	660	0.1649	0.0610	0.0000
465	0.2511	0.0739	1.5281	665	0.1212	0.0446	0.0000
470	0.1954	0.0910	1.2876	670	0.0874	0.0320	0.0000
475	0.1421	0.1126	1.0419	675	0.0636	0.0232	0.0000
480	0.0956	0.1390	0.8130	680	0.0468	0.0170	0.0000
485	0.0580	0.1693	0.6162	685	0.0329	0.0119	0.0000
490	0.0320	0.2080	0.4652	690	0.0227	0.0082	0.0000
495	0.0147	0.2586	0.3533	695	0.0158	0.0057	0.0000
500	0.0049	0.3230	0.2720	700	0.0114	0.0041	0.0000
505	0.0024	0.4073	0.2123	705	0.0081	0.0029	0.0000
510	0.0093	0.5030	0.1582	710	0.0058	0.0021	0.0000
515	0.0291	0.6082	0.1117	715	0.0041	0.0015	0.0000
520	0.0633	0.7100	0.0782	720	0.0029	0.0010	0.0000
525	0.1096	0.7932	0.0573	725	0.0020	0.0007	0.0000
530	0.1655	0.8620	0.0422	730	0.0014	0.0005	0.0000
535	0.2257	0.9149	0.0298	735	0.0010	0.0004	0.0000
540	0.2904	0.9540	0.0203	740	0.0007	0.0002	0.0000
545	0.3597	0.9803	0.0134	745	0.0005	0.0002	0.0000
550	0.4334	0.9950	0.0087	750	0.0003	0.0001	0.0000
555	0.5121	1.0000	0.0057	755	0.0002	0.0001	0.0000
560	0.5945	0.9950	0.0039	760	0.0002	0.0004	0.0000
565	0.6784	0.9786	0.0027	765	0.0001	0.0000	0.0000
570	0.7621	0.9520	0.0021	770	0.0001	0.0000	0.0000
575	0.8425	0.9154	0.0018	775	0.0001	0.0000	0.0000
580	0.9163	0.8700	0.0017	780	0.0000	0.0000	0.0000
Totals					21.3714	21.3711	21.3715

한 여러가지 근사를 하게 한다. 1960년에 CIE는 Mac-Adam의 제안을 표준 균일 색도 척도(Uniform Chromaticity Scale; USC)로 받아들여 1960CIE-UCS u, v도라고 부르고 있다. 변환공식은 다음과 같다.

$$U=\frac{4x}{-2x+12y+3}$$

$$V=\frac{6y}{-2x+12y+3}$$

여기에서

U, V=1960년 시스템의 색도좌표

, x, y=1931년 시스템의 색도좌표

1976년에 CIE는 CIELUV와 CIELAB로 알려진 두개의 새로운 3차원 균일 색공간을 추천하였다. CIELUV공간과의 결합에서 CIE1976UCS 색도좌표는 다음과 같이 정의된다.

$$U'=U$$

$$V'=\frac{3}{2}V$$

이 좌표계는 1960년 좌표계를 대신하고 더욱 균일한 색도도를 구성하리라 믿어진다.(색측정에 대한 더 많은 정보가 필요하면 IES Lighting Hand book을 참조할 것)

4. 스펙트럼측정

4.1 대의

빛의 SPD는 색도 좌표의 계산에 필요한 기본 데이터의 요소가 된다. 이러한 데이터는 스펙트럼측정에 의하여 얻어지는데 이것은 광원에서 나오는 빛을 각 요소 파장으로 분산시키고 각 파장의 좁은 대역의 세기를 측정하여 얻어진다. 스펙트럼측정은 Newton이 프리즘이 광선을 분산시키는 성질을 발견한 이후 실행되었다. 현재 스펙트럼측정은 가장 정확하고 믿을 수 있는 광원의 색도결정방법이다.

색과 같이 가시현상이 고려되는 경우에는, 대개 SPD는 360부터 830[nm]파장 범위에서 결정되며, 요구되는 분석을 나타내기에 충분한 좁은 대역으로 측정하여야 한다. 대개 곡선을 10[nm]간격으로 그리며, 약 10[nm]의 스펙트럼 대역을 통과하는 것에 기초한다. 최근에 컴퓨터를 사용하는 SDP는 대개 10[nm]보다 훨씬 좁은 대역을 사용한다. 선스펙트럼을 포함하는 광원의 경우에, 스펙트럼을 정확히 분석하기 위하여는 약 2[nm]의 대역 폭을 이용하여야 한다고 알려져 있다. 정의된 색도 계산은 컴퓨터에 사용할 수 있도록 대단히 단략화되어 스펙트럼측정 출력과 직접 연결시킬 수 있다. 현대 스펙트럼측정 시스템은 충분한 정확도를 얻을 수 있어 다른 색측정 방법(예를 들어 3자극 색측정기)의 표준으로 정의하여 사용할 수 있다. 대개 스펙트럼측정기는 모노크로메터(분산 기구), 모노크로메터의 출력 세기를 측정하기 위한 검출기와 데이터를 기록하기 위한 기록계로 구성된다. SPD를 알고 있는 표준 광원이 기기 교정에 사용된다.

스펙트럼측정 방법은, 교정을 하나의 표준 광원(대개 백열전구)에 대하여 한번 수행하면 스펙트럼분석기는-동일한 정확도로- 교정한 범위 내의 미지 SPD라면 어떠한 색의 광원의 SPD도 결정할 수 있는 잇점이 있다. 이 영역은 SPD도 결정할 수 있는 잇점이 있다. 이 영역은 360부터 830[nm]까지 간단히 수행할 수 있어 색도 결정에 필요한 영역을 감당할 수 있다.

4.2 모노크로메터

모노크로메터는 single-pass 혹은 double-pass 기구이다. 분산 부품으로 프리즘, 회절격자 혹은 이 둘의 조합을 사용한다. 프리즘은 값이 싸나, 분산이 파장에따라 변하는데, 예를 들면 장파장은 모노크로메터 출력에서 조밀하게 나타난다. 균일한 파장 간격(통과대역)은 데이타를 쉽게 분리하기 위하여 바람직하다. 회절격자는 균일한 분산이 가능하나 다수의 중복 스펙트럼 혹은 측정시에 분리시켜야만 하는 고조파를 발생시킨다. 예를 들면 360[nm]보다 짧은 모든 파장을 제거하는 필터를 사용하면 360부터 720[nm]까지 깨끗한 스펙트럼을 얻을 수 있는데, 이 영역은 광원의 색도에 중요한 용도로 사용된다.

720부터 830[nm]사이에서 나타나는 방사는

차단 필터로 제거할 수 없다는 것을 염두에 두어야한다. 360부터 830[nm]파장 영역 외부의 세기는 조도나 색에 아무런 영향도 미치지 않는다.

4.3 검출기

이상적으로, 검출기는 다음의 특성을 갖추어야 한다.

(1) 고감도(약한 강도가 모노크로메터에서 전달되기 때문)

(2) 입사속에대한 수십배 이상의 출력선형성(입력에 대한 출력의)

(3) 전 파장에서의 균일한 감도

(4) 시간경과와 환경조건의 변화에 대한 높은 안정성

위의 네가지 특성을 구현하는 검출기는 하나도 알려져 있지 않다. 결과적으로 각각의 장점과 단점이 특별히 적용되는 경우에 가장 적합한 것을 선택하기 위하여 검토되어야 한다.

과거에는 열전쌍이 모든 파장에 대하여 대체로 균일한 감도를 갖고, 선형성이 요구되는 동작범위에서 양호하므로 사용된 바 있었다. 그러나 이것은 비교적 감도가 낮고 제어된 환경을 필요로 한다.

광전배증관이 스펙트럼측정에 일반적으로 사용되고 있다. 이것은 고감도이며 선형적이며 환경 조건에 대하여 크게 민감하지 않다. 최근 안정성과 신호대 잡음비를 크게 개선시키는 발전이 있었다. 가장 큰 단점은 데이타 해석을 복잡하게 하는 스펙트럼 감도의 변화이다. 그러나 기기의 교정은 몇 개의 다른 이유에서 데이터 보정을 필요로 한다. 따라서 광전배증관 스펙트럼 감도의 변화에 대한 보정에는 별 어려움이 없다.

실리콘 검출기가 광전배증관보다 값이 대단히 싸고 더 안정되고 선형성이 있으므로 인기가 높아지고 있다. 그러나 감도가 단파장에서 급하게 감소하는 단점이 있다.

4.4 데이타 판독기

스펙트럼측정기로부터의 데이타 판독에는 여라가지 형태 중 하나를 택할 수 있다. 검출기 출력을 차트 기록기로 보내어 출력값으로 그려진 곡선에서 임의의 파장에 대응되는 값을 읽을 수 있으며, 검출기의 데이타로 표를 만들 수도 있다. 그 후에 보정된 데이타를 얻기 위한 처리를 다시 하여야 한다. 컴퓨터를 사용하는 경우에는 이렇게 처리하지 않은 데이타의 시각 검사도 종종 유용하다. 컴퓨터는 보정된 SPD곡선을 그릴 수 있으며, 더 나아가 색도좌표, 루우멘과 와트로 표현되는 램프 출력, 연색성지수와 보정된 SPD로부터 계산될 수 있는 유용한 정보들을 얻도록 데이터를 처리할 수 있다. 다음의 사항을 조심하여야 한다.

(1) 파장 교정의 오차(방사파장을 알고 있는 여러가지 저압 기체가 들어있는 스펙트럼 램프를 교정에 사용한다)

(2) 표준광원에 대한 전반적인 기기교정의 오차(보정 데이타)

(3) 측정하려는 광원에서 나오지 않았거나 모노크로메터에서 적절하게 분산되지 않은 빛에 의한 오차

5. 색도계

5.1 대의

색도계는 빛의 SPD를 측정하지 않고 빛의 색도를 측정하기 위하여 고안된 간단한 기구이다. 색도계는 직접 색도좌표를 출력하거나, 적당한 교정에 의하여 색도좌표로 변환시킬 수 있는 데이터를 제공한다.

5.2 광전 색도계

어떠한 색도계도 서로 다른 세 파장 영역에서 빛을 측정하여야만 이로부터 세개의 숫자를 구하여 색도 좌표를 계산할 수 있게 된다. 유용한 세 숫자는 3자극값(X, Y, Z)이다. 광전색도계는 필터와 광전지의 조합을 사용한다. 하나의 필터의 투과율과 광전지의 강도의 곱은 대략 색구별함수 $\bar{x}$가 되어야 하며, 마찬가지로 다른 필터들과 감지기 들도 대략 함수 $\bar{y}$와 $\bar{z}$가 되어야 한다. Barnes 색도계는 형광램프의 색

도측정을 위하여 미국에서 널리 사용된다. 이것은 보정 필터가 부착된 다섯개의 광전지($\bar{x}$ 함수에 3개, $\bar{y}$와 $\bar{z}$함수에 각각 하나)를 사용한다. 필터가 부착된 광전지는 여러가지 파장의 빛에 대하여 전기적인 응답을 낸다. 이 응답은 대략 CIE 3자극 값 X, Y, Z의 계산값에 비례한다. Barnes의 기본 디자인에 더 교정과 작동이 쉬운 기계를 만들기 위한 많은 변화가 있었다.

필터와 광전지의 조합이 CIE색조합함수를 정확히 복제하지 못하므로 Barnes형 색도계는 광원의 단일SPD를 집적 읽는 경우에만 사용할 수 있다. 대개 측정된 SPD가 언제나 동일한 안정된 광원이 사용된다. 안정된 광원의 색도는 대개 스펙트럼계측기로 측정한다. 색도계는 동일한 안정된 광원을 읽을 때 동일한 색도를 나타내도록 조정되거나 적당한 보정율을 적용한다. 이렇게 하면 거의 동일한 SPD를 갖는 미지의 광원을 더 정확하게 측정할 수 있다. 다른 SPD를 갖는 램프의 색도를 측정하는 경우, 새로운 SPD의 광원에 대하여 재교정을 하여야 한다.

Barnes 색도계는 형광램프를 측정하기 위하여 특별히 고안되었으나, 다음의 사항이 만족되면 어떠한 광원의 측정에도 사용될 수 있다.

(1) 광전지를 동작시키기에 충분한 빛이 있을것

(2) 광전지가 과량의 빛에 포화되지 않을 것

(3) 광전지들이 광원에 의하여 균일하게 빛을 받을 것

(4) 고색도 광원(예를 들어 Signal light)은 측정하지 말것.(Barnes와 다른 광전색도계는 충분한 정도로 정확하지 않을 수 있다.)

(5) 직접 교환이 필요할 것

실리콘 검출기와 마이크로프로세서를 사용하는 몇 가지 색도계가 최근에 등장하였다. 최신 계기는 더욱 빠르고, 더 안정하며, CIE색조합함수를를 더 가깝게 근사시킨 필터를 갖추고 있다. 대단히 값이 싸고 휴대가 가능한 계기들이 등장하고 있다.

6. 시각적 판단에 의한 색 배합

광원의 색도 계산 혹은 색의 연출을 목적으로 특별한 제한을 갖는 주어진 형태(즉, 냉백색 형광램프)에만 적용하므로 이러한 측정은 거의 동일하게 나타난다. 적격한 관찰자의 의견을 묻는 것과 어떤 정량적인 처리가 불가능한 경우 그들의 판단을 따르는 것도 합리적이라 생각된다. 관찰자가 색감각이 정상이고 더구나 색비교에 익숙하다는 것을 확실히 하는 것이 중요한 점이다. 미세한 색의 차이를 인식할 수 있는 관찰자의 능력은 색맹인 사람들을 제외하더라도 결코 같지 않다.

색 맞추기 경험은 유용하나 경험은 누구나가 동의하는 알려진 색 차이에 기초하여 축적되어야 한다. 색판단이 정상, 특히 관찰자가 배우는 기간에는, 이라는 보증이 있어야 한다. International Society Color Council(ISCC)에 의하여 준비되고 Federation of Societies for Coatings Technology(FSCT)에 의하여 배포된 색 적성 시험은 미세한 색의 차이를 구별할 수 있는 타고난 능력을 가진 사람을 선택하는데 상당한 가능성을 준다고 생각한다. 시험에는 색조각을 맞추고 그 결과를 평가하는 것이 포함되어 있다. American Optical Color Test는 색에 대한 결점이 있는 관찰자를 가려내는데 유용하다.

눈으로 보아 형광광원을 맞추는 기술은 고려하여볼만 하다. 비교대상 램프들은 서로 이웃하게 있어야만 하고, 기준이나 샘플 어느것도 끝에 있어서는 안된다. 즉, 판단할 램프의 양옆에는 다른 램프들이 있어야만 한다. 이러한 바깥쪽 램프들은 판단되는 램프와 색이 유사하여야만 한다. 모든 램프는 대략 같은 밝기여야 한다. 반사광의 색때문에 배경도 관찰자의 판단에 영향을 미칠 수 있다. 배경은 무채색(회색)이고 무광처리가 되어야 한다. 대개 램프의 중심부분이 색 판단에 사용된다. 관찰자는 표준과 미지의 램프를 적어도 두 방향에서 비스듬한 각도로 관찰하여야 한다. 관찰자는 미세한 색의 차이를 감지하며 중요한 색상과 채도 차이의 경향을 결정할 능력이 있어야 한다. 예를 들어 시험램프가 표준램프보다 다소 푸르다면 노란 빛을 시험램프에 더하도록 지적할 수

있고, 숙련된 관찰자는 때때로 몇 퍼센트의 노란색 빛이 더해져야 하는지를 판단할 수 있다.

색측정 데이터와 연관된 관찰은 둘의 한계를 잘 인식하고 있는 경우 유용하다. SPD가 다른 두 광원이 정상 관측자에게 정확히 같게 보일 수도 있으나 다른 관측자는 다소 차이나게 느낄 수도 있다. 색측정 데이터는 정확히 일치하나 정상 관찰자는 다르게 느끼는 경우도 있으며, 그 반대의 경우도 있다. 특정한 짝을 짓는 것(혹은 부족함을 결정)에 관하여는 평균된 합의에 따르는 것이 합리적이며, 모든 경우에 모든 사람의 감각에 잘 짝지어졌다고 느끼게 하는 것은 불가능하다는 것을 명심하여야 한다.

참 고 문 헌

1) IES Lighting Handbook, 1984, Reference Volume, New York, Illuminating Engireering Society at North America, 1984, Section 5.

2) "IES Practical Guide to Colorimetry of Light Sources", IES LM-16-1984, Journal of the Illuminating Engineering Society, Vol 18, No, 2, Summer 1989, P. 122.