

The Kwak03 Color Appearance Model

곽영신

삼성종합기술원, Imaging Solution Center
youngshin.kwak@samsung.com

Abstract

LUTCHI와 새로이 수집된 CII-Kwak 데이터를 이용하여 테스트한 결과 CIECAM02를 비롯해 현재까지 개발된 주된 color appearance model들이 몇 가지 중요한 color appearance 현상들을 설명하지 못한다는 것이 발견되었다. 본 논문에서는 이러한 문제점을 극복하기 위해 새로이 개발된 Kwak03 모델이 소개되었다. Kwak03 모델은 CIECAM02에 기초하고 있으나 achromatic signal에서 cone 신호들의 비율, dynamic response 함수 등 많은 면에서 큰 차이를 보인다. LUTCHI 및 CII-Kwak 데이터를 사용한 테스트 결과 Kwak03가 테스트된 모델들 중 특히 dark surround 하에서 휘도 및 배경색의 변화에 따른 색변화 예측에서 가장 우수한 결과를 보였다.

1. 서론

1977년 Hunt⁽¹⁾에 의해 구분된 바와 같이 색채과학의 발전은 크게 세단계로 나눌 수 있다. 첫 번째 단계는 색을 과학적으로 기술하는 것으로 두 물체의 색이 서로 일치하는지 아닌지를 구별하고자 하는 것이다. 현재 색채과학의 근본을 이루는 1931년에 수립된 CIE colorimetry가 이를 목적으로 이루어진 시스템이다. 그러나 두 색의 일치여부 보다는 색 차이를 정량화 시키고자 하는 현실적인 요구가 뒤따랐고 이는 색채과학 발전의 두 번째 단계 즉 사람 눈에 보이는 두 색의 차이를 수치로 나타내기 위한 시스템 구축으로 이끌었다. 그 대표적인 결과로 나타난 것이 1976년 CIE에 의해 제시된 CIELAB, CIELUV 색차식이다.

색채과학의 세 번째 단계이자 궁극적인 목표는 색을 사람 눈에 보이는 그대로 기술하는 것으로 이 단계의 결과물로 제시된 것이 color appearance model(CAM)이다. 가장 이상적인 CAM은 사람 눈으로 들어간 시각 정보가 어떤 과정을 거쳐 뇌에서 색으로 인식되는가에 대한 생리적인 과정을 수식화하는 것일 것이다. 그러나 사람의 뇌 작용에 대해서는 거의 알려진 바가 없어 현재까지의 모델들은 psychophysical 실험을 통해 얻어진 데이터를 기반으로 수식을 전개해왔다. 현재까지 개발된 대부분의 CAM은 입력 값으로 CIE colorimetry의 결과물인 삼자극치(tristimulus values)와 휘도, surround 등 주위 환경에 대한 정보를 필요로 하며 결과 값은 사람이 인지하는 색의 특성치인 lightness, chroma, hue* 등으로 표시된다. 지금까지 다양한 모델들이 다년간에 걸쳐 개발, 발전되어왔으며⁽²⁾ 1997년에 이르러 CIE는 그 당시까지 개발된 모델들의 장점을 모아 CIECAM97s⁽³⁾라는 모델을 개발, 제안하였다. 그 이후에도 CIECAM97s는 여러 번의 수정을 거쳐 2002년 CIECAM02⁽⁴⁾라는 이름으로 발표되었다.

가장 최근에 개발된 모델인 CIECAM02는 CIE TC8-01 멤버들의 많은 노력에 의해 CIECAM97s 모델의 단점을 극복하도록 설계되었다. 그러나 모델 개발을 위해 사용된 LUTCHI data⁽⁵⁾ 및 필자에 의해 수집된 CII-Kwak data⁽⁶⁾를 사용해 주위 환경 변화에 대한 색변화 예측 능력을 테스트해본 결과 CIECAM02를 비롯한 많은 모델들이 주된 현상 몇 가지를 예측하지 못하고 있음이 발견되었다. 본 논문에서는 color appearance data에서 나타나는 color appearance phenomena 특히 그중 이미지 상의 reference white의 휘도, background의 luminance factor, surround* 변화에 따른 색 변화 방향을 설명하고, CIECAM02를 포함한 8개 모델들 및 현재의 모델들에서 발견된 문제점을 해결하기 위해 개발된 새 모델 Kwak03⁽⁶⁾의 테스트 결과를 소개한다.

* Lightness, Brightness, Chroma, Colorfulness, Hue의 정의는 CIE International Lighting Vocabulary를 따름

† Background, Surround의 정의는 참고문헌 3 참조

2. Color Appearance Data and Color Appearance Phenomena

CII-Kwak 데이터는 LUTCHI 실험과 같이 magnitude estimation 방법을 이용하여 얻어졌으며 물체색에 대한 데이터가 더 많은 비중을 차지하는 LUTCHI 데이터를 보강하는 의미에서 디스플레이 상에서의 데이터를 얻는데 주력하였다. 실험 화면은 중앙의 test color, reference white, reference colorfulness 세 개의 패치와 주변의 20여개의 decoration 패치들로 구성되어 있으며 실험 동안 관찰자들은 화면 중앙에 나타난 test 칼라 패치의 lightness, colorfulness, hue를 각 성분의 시각적 크기(hue의 경우 성질)에 대응하는 숫자로 답하였다.

CII-Kwak 데이터는 전체 Group P, M, C, A, F의 5개 그룹, 16개 phase로 구성되었고 각 phase마다 약 40개의 색상이 평균 10명의 관찰자에 의해 평가되었다. Group P는 LCD 프로젝터를 사용한 일반적인 presentation 상황을 나타낸다. Group M은 암실에서 보여진 LCD monitor 칼라를 사용해 실험 되었고 Group C는 cinema 환경을 나타낸다. Group A에서는 외부 조명의 유무에 따른 즉 다시 말해 surround 변화에 따른 color appearance 변화를 CRT 모니터를 사용하여 조사하였다. Group F는 CRT 모니터에 여러겹의 필터를 사용하여 휘도를 mesopic 영역으로까지 낮춰 폭넓은 휘도 범위에서의 색변화를 조사하였다. 전체 LUTCHI 데이터는 8개 그룹, 59개 phase로 구성되어있고 phase당 적게는 40개에서 100여개 정도의 색이 평가되었다. 이 중 본 연구에서는 CII-Kwak 데이터와 같은 조건을 갖는 R-VL, R-LL, R-VL 그룹 (average surround, 물체색), CRT, 35mm 그룹 (dark surround, self-luminance) 만을 고려하였다. 표1은 본 연구에 사용된 데이터들을 정리한 것이다.

	Group	Surround	No. of Phases	Light Source	Ref. White (cd/m ²)	Background	No. of Observers	No. of Colors
CII-Kwak	P (Projector)	Dark	3	7200 K	19, 154	Grey/Black	21	32
	M (Monitor)	Dark	3	7200 K	~ 90	White	11 or 12	40
	C (Cinema)	Dark	4	7200/3900 K	~ 16	Grey/Black	9 or 11	40
	A (Ambient)	Dark/Average	2	7200 K	~ 86	Grey	11	40
	F (Filters)	Dark	4	7200 K	0.1 ~ 88	Grey	10 ~ 12	40
LUTCHI	R-HL	Average	6	D50, D65 WF, A	~ 250	White	6 or 7	~ 100
	R-LL	Average	6		~ 40	Grey		
	CRT	Dark	11		~ 40, 20	Black		
	35mm	Dark	6	4000 K	47 ~ 113	Grey	5 or 6	~ 99
	R-VL	Average	6	5000K	0.4 ~ 843	Grey	4	40

표1: CAM 테스트 및 Kwak03 개발을 위해 사용된 실험 데이터들

CII-Kwak와 LUTCHI 데이터, 이 두개의 독립적인 실험 데이터로부터 reference white의 휘도, background luminance factor, surround 조건의 변화에 따른 색의 변화가 공통적으로 발견되었고 그 내용은 다음과 같다.

- (1) Reference white의 휘도가 높을수록 lightness의 contrast는 감소하고 (lightness 증가) colorfulness는 증가하는 반면 hue는 별 차이를 보이지 않는다.
- (2) Background luminance factor가 높을수록 즉 배경색이 밝을수록 lightness는 감소 (명도대비), colorfulness는 증가한다. Hue는 거의 영향을 받지 않는다.
- (3) Average surround일 때 dark surround에 비해 lightness는 감소하나 colorfulness는 증가하며 Hue 변화는 거의 없다.

3. Color Appearance Model들의 성능 평가

표1에 정리된 데이터들을 사용하여 모두 8개의 CAM들(CIELAB, LLAB, RLAB, Hunt94, CIECAM97s, FC, Fairchild, CIECAM02)이 테스트 되었다. 각 모델의 데이터 전체에 대한 평균 CV* (coefficient of variation)값은 표2에 나타내었다. 표에서 나타난 바와 같이 CV값만 고려하였을 경우에 일반적으로 CIELAB, RLAB을 제외한 모든 모델들이 비슷하게 좋은 결과를 보였으나 chroma와 colorfulness 예측에서는 Fairchild 모델이, brightness 예측에서는 CIECAM02가 상대적으로 안 좋은 결과를 보였다.

$$CV = 100 \frac{\sqrt{\sum (k \cdot x_i - y_i)^2 / n}}{\bar{y}}$$

CV값은 실험 데이터와 각 모델의 예측치의 차이를 나타내는 수치로 두 데이터가 일치한다면 CV값은 0이 된다.



서론에서 언급된 바와 같이 본 연구는 단순한 예측 정확도 보다는 환경 변화에 따른 색변화 정도 및 방향을 얼마나 잘 예측하는가에 대해 관심을 갖고 모델들을 테스트한 결과 테스트에 사용된 모든 모델들이 특히 dark surround의 경우에 휘도 변화에 따른 lightness contrast의 변화와 background luminance factor 변화에 따른 colorfulness 변화를 설명하지 못한다는 것을 발견하였다. 그림1은 그 예의 하나로 각 모델들의 dark surround 하에서 휘도 변화에 따른 lightness contrast 변화의 차이 예측정도와 실제 실험 데이터를 비교한 것이다. 가로축은 Group F 중에 CRT 모니터 상에서 reference white 휘도가 1.0 cd/m², grey background를 갖는 phase를 나타내고 세로축은 같은 그룹 내에서 다른 조건은 같고 reference white 휘도만 87.4 cd/m²로 차이를 보인 phase를 나타낸다. 이 두 phase들은 휘도만 다르고 chromaticity는 같은 색들을 사용하여 실험하였으므로 직접 비교가 가능하다. 그림1의 (a), (b) 두 그래프는 테스트된 모든 모델들이 lightness contrast 변화를 전혀 보이지 않고 있음을 명확히 보여준다.

Attribute	CIELAB	LLAB	RLAB	Hunt94	CIECAM97s	FC	Fairchild	CIECAM02	Kwak03
Lightness	19.2	14.9	26.0	12.6	14.6	14.3	14.2	14.5	11.8
Brightness				11.5	13.6	13.0	12.1	22.3	11.4
Chroma	26.3	21.3	27.6	20.3	19.5	19.8	23.5	20.0	18.9
Colorfulness		22.7		23.6	21.9	22.2	27.1	23.4	21.4
Hue		8.9	11.2	8.3	7.9	8.0	7.9	7.6	7.4

표2: 8개의 CAM 및 Kwak03의 평균 CV값

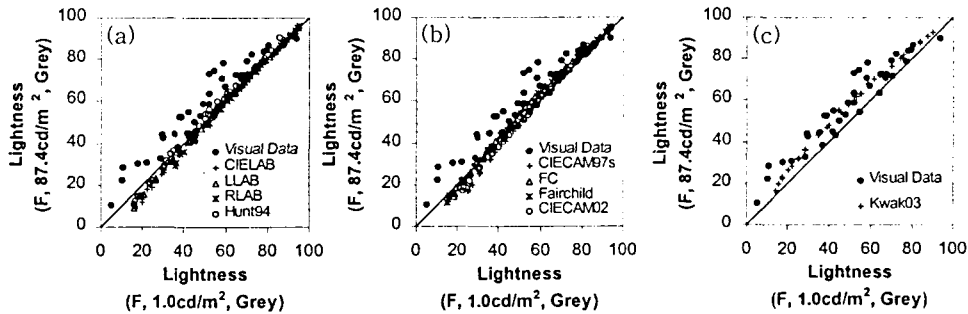


그림1: 8개 CAM 모델들의 dark surround 하에서 휘도 변화에 따른 lightness contrast 변화 예측

4. 새로운 color appearance model, Kwak03

CIECAM02를 비롯한 가장 보편적으로 쓰이고 있는 모델들이 중요 color appearance 현상들을 예측하지 못함에 따라 이 문제를 해결하기 위해 이전 모델의 전폭적인 수정이 요구되었다. 이러한 요구에 부합하기 위해 만들어진 Kwak03는 가장 최근에 개발된 모델인 CIECAM02의 구조를 기반으로 하고 있으나 상당부분의 수식이 실험 데이터를 설명하기 위해 새롭게 수정되었다. CIECAM02는 CIECAM97s에서 발견된 수학적 문제들을 해결하도록 설계되었고 CIE에서 공식적으로 사용을 제안(recommend)하는 모델이니만큼 CIECAM02의 틀 안에서 모델을 개발하는 것이 가장 합리적이라 할 수 있다.

Kwak03는 CIECAM02와 마찬가지로 크게 세 단계로 나눌 수 있다. 우선 임의의 test condition하에서 보여진 색자극의 삼자극치는 첫 번째 단계에서 chromatic adaptation 과정을 통해 reference condition에서 동일한 색으로 보이는 색자극의 cone 신호로 바뀐다. 두 번째 단계에서 cone 신호들은 세 개의 opponent color signal들(black-white, red-green, yellow-blue)로 변환되고 마지막 단계에서 이 신호들을 사용하여 color appearance들이 계산된다. 예측된 color appearance들은 크게 세 개의 그룹 즉 achromatic, hue, chromatic predictor들로 나누어진다. Kwak03 모델에 관한 자세한 내용은 참고문헌 6번에서 확인할 수 있으며 이곳에서는 CIECAM02 모델과의 가장 큰 차이들만 소개하겠다.

(1) Kwak03에서는 CIECAM02에서 정의된 adaptation luminance L_A 를 사용하지 않고 reference white의 휘도, L_w 와 background luminance factor, Y_b 만을 사용하여 전개된다. 이는 L_w 와 Y_b 의 곱으로 표시되는 L_A 의

사용을 피함으로써 L_w 와 Y_b 가 color appearance에 미치는 영향을 상호 독립적으로 구현하기 위한 것이다. (2) Kwak03를 다른 모델과 구별 짓는 가장 큰 차이들 중의 하나는 dynamic response 함수를 사용하지 않았다는 것이다. 기존 CIECAM97s를 기반으로 하는 모델들은 Hunt94에서 사용된 것과 같은 형태의 dynamic adaptation 함수를 사용하여 cone 신호들을 변형시키는데 이는 주위 환경의 휘도 변화에 사람 눈이 순응하는 현상을 수식화한 것이다. 그러나 실험 데이터에서 보인 휘도 변화에 따른 lightness contrast 변화를 설명하기 위해서는 기존의 dynamic response 함수 형태로는 효과적이지 않다는 것이 발견됨에 따라 Kwak03에서는 수학적 편의를 위해 기존의 함수 형태 대신 cone 신호들을 power 함수를 사용하여 압축시킨 후 (이 과정은 Hunt⁽⁷⁾가 unique hue 예측에서 보인바와 같이 color appearance predictor를 구성하는데 필수적이다.) 후반부 color appearance 성분들을 계산할 때 휘도에 따른 변화를 고려해 주도록 구성하였다. (3) 또 다른 Kwak03의 큰 특징 중의 하나는 achromatic 신호, A,에서 R, G, B cone의 조합 비율이 기존의 2:1:0.05에서 2:1:0.5로 바뀌었다는 것이다. 이는 사람 눈의 망막에서 발견된 세 종류의 cone 개수 비에서 근거한 기존 비율과는 대치되나 실험을 통해 얻어진 lightness 데이터를 훨씬 효과적으로 예측한다. 이러한 비율의 변화는 데이터 fitting만을 근거로 하는 만큼 향후 blue cone 역할의 증가를 설명할 만한 좀더 구체적인 근거가 요구된다. (4) 마지막으로 주목할만한 차이는 colorfulness predictor에서 background luminance factor에 따른 colorfulness 변화가 기존 모델들과는 반대라는 것이다. 기존 모델들은 배경색이 밝을수록 lightness가 감소하므로 이에 따라 colorfulness도 감소하는 것으로 예측하나 이는 앞 절에서 보인바와 같이 실제 실험결과와 상치한다.

5. Kwak03 모델의 성능 평가

Kwak03 모델도 본 연구에 사용된 다른 모델들과 마찬가지로 방법 즉 평균 CV값 및 scatter diagram을 이용한 color appearance phenomena 예측 능력을 사용하여 평가되었다. 표2의 마지막 행과 그림1의 (c) 그래프가 그 결과를 나타낸다. 표2에서 보이는 바와 같이 Kwak03가 모든 color attributes에 대해 다른 모델들보다 더 좋거나 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 특히 lightness와 brightness의 향상 정도가 주목할만하다. 그림1의 (c) 그래프는 (a), (b)에 비해 Kwak03 모델이 휘도변화에 따른 lightness contrast 변화를 가장 잘 예측하고 있음을 분명히 보여준다.

6. 결론

LUTCHI와 CII-Kwak color appearance 데이터를 사용하여 휘도, background, surround 등의 외부 환경 변화에 따른 색변화 현상들을 분석한 결과 이미지의 휘도가 높아질수록 색들의 lightness와 colorfulness가 증가하며 background가 밝아질수록 또 average surround일때 dark surround에 비해 lightness는 감소, colorfulness는 증가하는 것으로 나타났다. 동일한 데이터들을 이용해 8개의 CAM(CIELAB, LLAB, RLAB, Hunt94, CIECAM97s, FC, Fairchild, CIECAM02)을 테스트해본 결과 CV값 모든 모델이 데이터에서 발견된 색변화 현상들 중 dark surround에서 휘도 변화에 따른 lightness 변화와 background 변화에 따른 colorfulness변화를 제대로 예측하지 못하였다.

테스트된 모델들의 문제점을 해결하기 위해 Kwak03 모델이 제안되었다. Kwak03는 CIECAM02를 기반으로 하나 dynamic response 함수의 제거, achromatic 신호에서 cone 신호들 간의 비율 변화 등에서 큰 차이를 보인다. Kwak03는 CV 값에서 다른 모델에 비해 향상된 결과를 보일뿐 아니라 환경변화에 따른 색변화 예측에서 우수한 결과를 보였다.

참고문헌

1. R.W.G. Hunt, "The specification of colour appearance I. Concepts and terms", *Color Res. Appl.* 2, 55-68, 1977
2. M.D. Fairchild, *Color appearance models*, Addison-Wesley, Massachusetts, 1998
3. M.R. Luo, R.W.G. Hunt, "The structure of the CIE 1997 colour appearance model (CIECAM97s)", *Color Res. Appl.*, 23, 138-146, 1998
4. N. Moroney, M.D. Fairchild, R.W.G. Hunt, C. Li, M.R. Luo, T. Newman, "The CIECAM02 colour appearance model", Proc. The 10th color imaging conference, Scottsdale, USA, Nov. 2002
5. <http://colour.derby.ac.uk/colour/info/lutchi>
6. Y. Kwak, *Quantifying the colour appearance of displays*, PhD Thesis, University of Derby, 2003
7. R.W.G. Hunt, "A model of colour vision for predicting colour appearance", *Color Res. Appl.* 7, 95-112, 1982

