

색차식의 발전 현황과 섬유산업에서의 적용

홍민기, 김삼수

영남대학교 섬유패션학부 섬유소재가공전공

1. 서론

색의 차이를 정확히 표현한다는 것은 아무리 경험이 많은 사람이라도 무척 어려운 일이며, 그 판정 결과는 관측자에 따라 주관적일 수 밖에 없다. 이런 이유로 제품의 경쟁력으로 직결되는 섬유 염색물의 색 재현성 등과 같은 측면에서 색의 허용범위에 대한 사람마다의 견해가 달라서 쟁점이 되는 경우가 많을 수 밖에 없다.

이러한 색차관리에 있어서의 주관적이고 감각적인 면에 대해 보다 객관적이고 정확한 색차 표시를 위한 방법이 연구되기 시작하여, 색차를 수치로 변환하고 기기에 기초한 수치적 계산을 통해 색차를 표시하는 방법으로 색차식이 제안되어 왔다. 색차식은 그 의미 그대로 색차를 수치로 변환하고 계산을 통해 색차의 표현을 가능하게 하는 것으로 색차식을 사용하는 주된 목적은 관측자가 시각적으로 지각하는 감각적 색차와 기기 측정 후 색차식으로 계산한 수치적 색차간의 높은 상관관계를 얻기 위함이다. 즉 색차식은 감각적 색차에 대해 만족할 만한 수치적 색차 판정 성능을 전제로 기존의 시각에 의존하던 주관적이고 비효율적이던 판정 방식을 탈피하여 보다 객관적인 판정과 원활한 컬러 커뮤니케이션을 도모할 수 있게 한다.

최근 과학 기술 분야에서 IT산업의 발전은 전 산업 영역에서의 디지털화와 DB화를 가속화, 체계화하게 되었고, 섬유·염색 산업에 있어서도 색채관

리의 분야 등에서 이러한 접근의 중요성이 부각되고 있다. 색차식은 이러한 요구에 부응하여 CCM(computer color matching) 등의 색채관리 시스템에 접목되어 색차의 수치화에 따른 효율적인 색채 품질관리 및 원활한 컬러 커뮤니케이션을 가능하게 함으로써 그 중요성 및 활용가치가 증가하고 있는 추세이다[1-3].

따라서 현재까지 연구되어지고 발전되어진 표색계 및 색차식들에 대한 검토를 통해 산업에서의 적용가치에 대해 전망해 보고자 한다.

2. 색차식의 현황

2.1. 1976년 이전의 색차식

색채에 관한 연구와 색차식의 발전은 시대적으로 CIELAB[4,5] 색차식과 CIELUV[4,5] 색차식이 제안되어진 1976년을 기점으로 분류할 수 있다. Table 1에 각 연도별 개발되어진 중요 색차식을 나타내었다.

1931년 국제조명위원회(Commission Internationale de L'eclairage ; CIE)에서 최초로 스펙트럼 광의 XYZ 3자극치를 기반으로 한 CIE 표색계[4,5]를 제안한 이래로 본격적인 색채 연구가 진행되어 1976년 이전까지 20개 이상의 색차식이 개발되어져 왔다.

Table 1에서 보는 바와 같이 1976년 이전에 제안되어진 색차식들은 일반적으로 1943년 A. H. Munsell에 의해 개발되어진 Munsell data와 1942년에 관측자의 시각평가에 의존하여 구축되어진 타원

표색계의 MacAdam data 등의 실험적 데이터를 사용하거나 CIE 표색계(CIE chromaticity diagram)의 XYZ 3차극치의 선형변환에 기초하여 개발되어졌다[1,5]. 이들 중 가장 대표적인 색차식으로서 1944년 Adams와 Nikerson에 의해 Munsell 색공간을 바탕으로 제안되어진 ANLAB(ΔE_{ANLAB}) 색차식을 들 수 있는데 이 색차식은 다음의 식 (1)과 같다[6,7].

$$\Delta E_{ANLAB} = 40\{(0.23\Delta V_y)^2 + [\Delta(V_x - V_y)]^2 + 0.4[\Delta(V_z - V_y)]^2\}^{1/2}$$

$$\text{and } I = 1.2219V_l - 0.23111 V_l^2 + 0.23951V_l^3 - 0.021009V_l^4 + 0.00084045V_l^5 \quad (1)$$

where) V is the Munsell value function defined. The factor of 40 for the entire formula has been most frequently used to “normalize” the size of the color-difference unit. And I corresponds to X, Y or Z tristimulus values.

ANLAB 색차식의 이해를 돕기 위해 Adams-Nikerson 표색계(ANLAB color space)를 소개하면, 1942년 Adams가 발표한 등색차 표색계로서 그 후에 Nikerson에 의해 개량되어 Adams의 색공간에서 쉽게 사용할 수 있는 Munsell renotation value를 개발하였다. 이것이 현재 Adams-Nikerson 또는 ANLAB color space라고 불리는 색공간으로 그 표현식은 다음 식 (2)와 같다[7].

$$\begin{aligned} L &= 9.2V_y \\ a &= 40(V_x - V_y) \\ b &= 16(V_y - V_z) \end{aligned} \quad (2)$$

where) ‘40’은 단위거리의 크기를 다른 비교 색공간의 그것과 근사적으로 동일하게 맞추기 위한 scaling factor이다.

V_y 는 Munsell의 명도함수이며, V_x 는 같은 식에서 Y를 X/X_n 으로 대체하여, V_z 는 같은 방법으로 Y를 Z/Z_n 으로 대체하여 구한다.

이 ANLAB 색차식은 영국 Society of Dyers and

Colourists(SDC)의 측색분과위원회인 Colour Measurement Committee에 의해 제안되어 졌으며, 특히 섬유산업에서 널리 보편화 되어 1971년 섬유 산업용으로 ISO(International Organization for Standardization ; 국제표준제정기구)의 국제규격 인증을 받기도 하였다[6].

또한 1974년 McDonald는 ANLAB 색차식을 기반으로 하여 다음의 식 (3)과 같은 간단한 색차식 (ΔE_a)을 유도하기도 하였다.

$$\Delta E_a = \frac{\Delta E_{ANLAB}}{1+0.0275C_{ANLAB}} \quad (3)$$

where) C_{ANLAB} is the the ANLAB chroma for the standard of the pair considered.

이 색차식(ΔE_a)은 ANLAB 색차식의 성능을 상당히 향상시켰으며 이러한 색차식의 유도 개념은 후에 기술할 CIELAB 색차식을 기반으로 도출되어진 많은 색차식을 개발하는데 유용하게 적용되어졌다[7].

2.2. CIELAB와 CIELUV 색차식

1976년 국제조명위원회(CIE ; the Commission Internationale de l'Éclairage)는 당시 40여 개의 색차식이 사용되던 상황에 대해 표준 색차식으로서 CIE 1976 $L^*a^*b^*$ (약칭 CIELAB)와 CIE 1976 $L^*u^*v^*$ (약칭 CIELUV) 색차식을 제안하였다[4,5]. CIELAB와 CIELUV가 거의 비슷한 성능을 가진 시각적으로 균일한 공간의 색차식으로 추천되었지만 산업계에서 CIELUV 색차식은 TV나 조명산업용 등으로 제한되어 사용되어진 반면, CIELAB 색차식은 표면 색차의 평가시 섬유, 페인트, 프린트 잉크 등의 여러 산업에 광범위하게 사용되었다. 이것은 당시 기존의 산업이 Lab 타입의 색공간, 예를 들어 Adams-Nikerson의 L, a, b나 Hunter의 L, a, b에 많이 익숙해 왔기 때문이다. 더 나아가 McLaren과 McDonald가 섬유산업을 위해 개발한 최적화 식

Table 1. color-difference formula의 개발 방법 및 년도에 따른 구분

Year/Category	Munsell data	MacAdam data	Linear transformation from XYZ	Modification of CIELAB	Other
Before 1976					
1935			Judd		
1936	Index of Fading				
1937			MacAdam		
1939	Balinkin				
1942			JHNBS		
1943	Munsell Renotation				
1944	ANLAB				
1946	Saunderson & Milner				
1951	Godlove				
1955					DIN
1958	Reilley cube root	Simon-Goodwin	Hunter LAB	CIE $U^*V^*W^*$	
1963					
1965			Friele		
1967			FMC-I		
1969	Moton cube root				
1971	MLR	FMC-II			
1972	MRC				
1974	ΔE_a				OSA
During 1976					
1976	CIELAB		CIELUV		
After 1976					
1978		FCM			
1980	LABHNU			JPC79	
1984	ATD			CMC	
1986	SVF				
1987				BFD	
1991	KC-III				
1995				CIE94	
1997				LCD	
1999	Kuehni				GLAB
2001	Oleari			CIEDE 2000	

은 ANLAB에 기반하는데 이는, 자연스럽게 CIELAB의 사용을 유도하였고 CIELAB 좌표를 이용한 식들을 이용하게 하였다[1,6,7].

현재까지도 전 세계적으로 색물체를 측정하는데 있어서 모든 산업분야에 CIELAB 표색계가 가장 보편적으로 사용되고 있으며, 이 색공간에서 각 색좌표의 위치에 대한 입체적인 거리로 표현되는 CIELAB 색차식은 전술한 바와 같이 ANLAB 색차식의 복

잡한 다항식을 간소화함으로써 도출되어진 색차식이다. 다음 Figure 1과 식 (4)에 CIELAB 색공간과 색좌표의 계산방법을 나타내었고, 그 색좌표에 대한 CIELAB 색차식(ΔE^*_{ab})의 수치적 색차 계산은 식 (5)와 같다[4,5].

$$L^* = 116f(Y/Y_n) - 16$$

$$a^* = 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)]$$

$$b^* = 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \quad (4)$$

where) $f(t) = t^{1/3}$, for $t > 0.008856$ otherwise, $f(t) = 7.7871 + 16/116$

X, Y, Z and X_n, Y_n, Z_n are the tristimulus values of the sample and a specific reference white considered.

CIELAB 표색계는 L^*, a^*, b^* 의 입체좌표로서 색을 표시한다. L^* 는 명도(lightness)를 표시하며 채도좌표의 x축은 a^* 로, y축은 b^* 로 표시한다. 또 이 표색계에서 $+a^*$ 는 red 방향, $-a^*$ 는 green 방향, $+b^*$ 는 yellow 방향, $-b^*$ 는 blue 방향이다. 중앙은 무채색에 해당되며 $a^* = 0, b^* = 0$ 의 위치이다. $L^* = 100$ 이면 순수 white, $L^* = 0$ 이면 black을 나타낸다. a^* 와 b^* 가 증가할수록 중심에서 멀어지며 채도가 높아져 맑은 색을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \Delta E_{ab}^* &= (\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2})^{1/2} \quad \text{or} \\ \Delta E_{ab}^* &= (\Delta L^{*2} + \Delta C_{ab}^{*2} + \Delta H_{ab}^{*2})^{1/2} \end{aligned} \quad (5)$$

where) $\Delta H_{ab}^* = (\Delta E_{ab}^{*2} - \Delta L_{ab}^{*2} - \Delta C_{ab}^{*2})^{1/2}$
 CIE 1976 a, b chroma $\Delta C_{ab}^{*2} = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$
 CIE 1976 a, b hue-angle $\Delta h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*)$

a^*, b^* 좌표축의 극좌표 전환을 이용한 채도와 색상각도의 정의가 먼셀 시스템과 잘 일치하는 등의 장점을 통해 CIELAB 색차식은 전 세계적으로 모든 산업분야에 걸쳐 광범위하게 사용되어졌다. 그

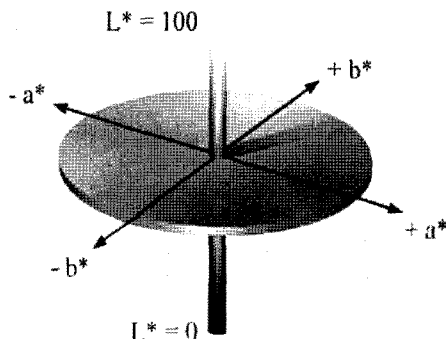


Figure 1. Lab 표색계.

러나 1976년 이후의 많은 연구를 통하여 CIELAB 색차식이 특정 색공간 및 색차허용범위(타원)에 대해 만족할만한 성능을 나타내지 못한다는 결과가 확인되어 이를 수정하고자 하는 연구가 다양하게 진행되어지고 있다[6,8].

2.3. 1976년 이후의 색차식의 발전

전술한 바와 같이 1976년 이후 연구된 많은 시관측 평가 data를 통해 CIELAB 색차식은 시관측 결과와 많은 불일치를 보이는 것이 알려졌다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 1976년 이후부터 CIELAB 색차식을 수정하여 좀 더 시관측 결과와 일치하는 색차식을 찾으려는 연구가 다양하게 이루어졌다.

대표적인 수정 CIELAB 색차식으로는 CMC[9], BFD[10,11], CIE94[12,13], LCD[14,15] 식 및 최근 CIE에서 제안된 CIEDE2000[7] 식이 있는데, 이들은 모두 CIELAB 색공간을 기반으로 하고 있으며 여러 면에서 많은 유사점을 가진다. 인간의 시각은 색상의 변화에는 민감하지만 그에 비하여 채도의 변화에는 덜 민감하기 때문에 허용체적의 채도축이 길어져 기준색으로부터 같은 색으로 인식되는 색공간 즉, 색상 허용체적이 CIELAB식에서 계산되는 구가 아니라 Figure 2와 같이 타원체가 된다. 따라서 수정 색차식들은 모두 기준색 주위로 명도, 채도, 색상의 각 방향으로의 허용타원체의 크기를 계산하는 색차 가중 함수를 색차식에 도입함으로써 시관측과의 불일치를 개선하였다[9-17]. 이러한 개선된 색차식 중 섬유 염색 산업에서 가장 많이 이용되는 색차식은 CMC 색차식으로 영국염색학회(SDC)의 측색위원회(CMC : Colour Measurement Committee)는 CMC($l:c$) 색차식을 표준 색차식으로 추천하고 있다.

2.3.1. CMC($l:c$)와 JPC79 색차식

J&P Coasts의 McDonald는 전문가의 시각적 판단을 기초로 하는 수많은 데이터를 바탕으로 색차 허용치 계산 시의 오차를 체계적으로 연구하여

CIELAB와 CIELUV 색차식이 적절하지 못함을 지적하였고, 1980년에 이 시각 판정 데이터를 바탕으로 새로운 JPC79[18] 색차식을 제안하였다. 그러나 영국염색학회의 측색위원회에서는 JPC79 색차식이 아주 어두운 색이나 거의 회색인 영역에서 비정상적인 것을 밝혀냈으며, 섬유가 아닌 물질의 색차 판정에 있어서 명도 가중치가 너무 완만한 것으로 평가하였다. 따라서, 1984년 영국염색학회의 측색위원회는 JPC79의 L_t 함수에 2를 곱하고, 명도차·채도차·색상차 간의 시각각 불일치에 대해 가중함수 l 과 c 를 도입함으로써 JPC79 색차식을 수정하여 CMC($l:c$) 색차식을 제안하였다[9].

이 CMC($l:c$) 색차식은 CIELAB 색차식에 기반한다고 할 수 있으며, 시관측 결과에 대한 CIELAB 색차식의 단점을 보완함으로써 색차의 판정에 있어서 상당한 진전을 가져오게 되었다는 평가를 받고 있다. 현재까지 CMC 색차식은 영국표준(BS), AATCC(the American Association of Textile Chemistry and Colourists) 시험법 및 ISO (the International Standard Organization)의 표준으로 채택되어 광범위하게 특히, 섬유 염색 업계에서의 색차계산에 널리 사용되고 있다[6,8]. 특히 CMC(2:1) 색차식이 많이 이용되는데, 앞서 설명한 바와 같이 이는 사람이 명도의 변화를 크게 느끼지 못하기 때문에 명도의 허용치를 크게 하여 명도차가 크게 발생하더라도 결론적인 색차값(ΔE)은 큰 차이가 없도록 만든 것이다. 다음 Figure 3에 CMC(1:1) 색차식에 상응하는 색차허용타원의 거동을 CIE a^*b^* diagram에 나타내었고, 이 CMC 색차식의 색차 계산은 식(6)과 같다[6,9].

$$\Delta E_{CMC} = [(\Delta L^*/lS_L)^2 + (\Delta C^*_{ab}/cS_C)^2 + (\Delta H^*_{ab}/S_H)^2]^{1/2} \quad (6)$$

where)

$$S_L = 0.040975L^*/(1+0.01765L^*)$$

unless $L^* < 16$ when $S_L = 0.511$

$$S_C = 0.638 + 0.0638C^*_{ab}/(1+0.0131C^*_{ab})$$

$$S_H = S_C(Tf + 1 - f)$$

$$f = [C^*_{ab}{}^4 / (C^*_{ab}{}^4 + 1900)]^{1/2}$$

$$T = 0.36 + 0.4\cos(h_{ab} + 35^\circ),$$

unless h_{ab} is between 164° and 345° ,

when $T = 0.56 + 0.2\cos(h_{ab} + 168^\circ)$

2.3.2. BFD($l:c$) 색차식

1987년 Brandford 대학의 Luo와 Rigg는 기존의 여러 실험 데이터를 종합하고 광범위한 통계 분석 및 추가적인 실험을 통해 하나의 통합된 포괄적인 data set를 구축하였으며, 이 data set으로부터 다음 식 (7)과 같은 BFD($l:c$) (ΔE_{BFD}) 색차식을 유도하였다[10,11].

$$\Delta E_{BFD} = [(\Delta L_{BFD}/l)^2 + (\Delta C^*_{ab}/cD_C)^2 + (\Delta H^*_{ab}/D_H)^2 + R_T(\Delta C^*_{ab}\Delta H^*_{ab}/D_C D_H)]^{1/2} \quad (7)$$

where)

$$L_{BFD} = 54.6\log_{10}(Y + 1.5) - 9.6$$

$$D_C = 0.521 + 0.035\bar{C}^*_{ab}/(1 + 0.00365\bar{C}^*_{ab})$$

$$D_H = D_C(GT' + 1 - G)$$

$$G = [\bar{C}^*_{ab}{}^4 / (\bar{C}^*_{ab}{}^4 + 14000)]^{1/2}$$

$$T' = 0.627 + 0.055\cos(\bar{h}_{ab} - 254^\circ) - 0.040\cos(2\bar{h}_{ab} - 136^\circ) + 0.070\cos(3\bar{h}_{ab} - 32^\circ) + 0.049\cos(4\bar{h}_{ab} + 114^\circ) - 0.015\cos(5\bar{h}_{ab} - 108^\circ)$$

$$RT' = R_H R_C$$

$$R_H = -0.260\cos(\bar{h}_{ab} - 308^\circ) - 0.379\cos(2\bar{h}_{ab} - 160^\circ) - 0.636\cos(3\bar{h}_{ab} + 254^\circ) + 0.226\cos(4\bar{h}_{ab} + 140^\circ) - 0.194\cos(5\bar{h}_{ab} + 280^\circ)$$

$$R_C = [\bar{C}^*_{ab}{}^6 / (\bar{C}^*_{ab}{}^6 + 7 \times 10^7)]^{1/2}$$

* The terms \bar{C}^*_{ab} and \bar{h}_{ab} refer to the mean value for the standard and sample
 $l = c = 1$ for perceptibility of color difference
 $l = 1.5, c = 1$ for acceptability of color difference
 $l = 0.67, c = 1$ for large color difference

1976년 이후 색차식의 상수적 색상각이 지각되는 색상과 일치하지 않는 경우가 많아서 색차판정의 예외적인 결과가 나올 수 있다는 문제점이 지적되어 왔다. 즉, 색공간에서 CMC를 비롯한 기존 색차식들에 의해 예상되어지는 색차허용타원은 모두 중심점을 향하고 있는 것에 반해 실험 data set에 의해 산출되어진 색차허용타원은 특정 색공간 영역에서 중심점을 향하지 않는다는 것이 확인되었다. Luo-Rigg 통합 data set은 그 CIELAB a*b* diagram(Figure 4)을 통해 이러한 경향을 잘 지적하고 있으며 특히, blue의 색공간 영역에서 이러한 문제점이 명확하게 나타나고 있다는 것을 확인할 수 있다[6,7]. 따라서 Luo-Rigg 통합 data set으로부터 유도되어진 수정 색차식인 BFD(l:c)는 CMC 색차식과 전체적으로 유사한 구조를 가지지만 이러한 색차허용타원 거동에 있어서의 문제점에 대해 회전요소를 반영함으로써 개발되었다고 할 수 있다.

2.3.3. CIE94 색차식

1991년 미국 Rochester Institute of Technology의 Munsell Color Science 연구실과 Dupont Automotive 사는 새로운 색차식의 도출 및 테스트를 위해 광범위한 시각판정 실험을 바탕으로 RIT-Dupont data set를 발표하였다. Figure 5에서 보는 바와 같이 이 RIT-Dupont의 실험 data에 의한 색차허용타원을 Luo-Rigg의 data set와 비교하였을 때 상당부분 일치함이 확인되어 매우 객관적이고 합리적인 데이터로 평가되어 지고 있다. 따라서 1994년 CIE는 이 RIT-Dupont data set을 기반으로 CIELAB 색차식의 수정을 통해 유도된 CIE94(ΔE_{94}) 색차식을 유도하였다. 식 (8)에 CIE94 색차식을 나타내었다[12,13].

$$\Delta E_{94} = \left[\frac{(\Delta L^*_{ab}/K_L S_L)^2 + (\Delta C^*_{ab}/K_C S_C)^2 + (\Delta H^*_{ab}/K_H S_H)^2 \right]^{1/2} \quad (8)$$

where)

$$S_L = 1$$

$$S_C = 1 + 0.045C^*_{ab}$$

$$S_H = 1 + 0.015C^*_{ab}$$

※ $K_L = K_C = K_H = 1$ for most applications

$K_L = 2, K_C = K_H = 1$ for the textile industry

식 (8)에서 보는 바와 같이 CIE94 색차식은 CMC 색차식과 유사하지만 명도차 가중함수를 1로 두고 채도차 및 색상차 가중함수를 채도에만 의존하는 일차함수로 가정함으로써 식을 매우 단순화하였다. 그리고, 매개변수인 K_L, K_C, K_H 는 CMC 색차식의 l, c, h 와 같은 기능을 가지며 섬유산업의 경우에 K_L 은 2, K_C 와 K_H 는 1로 적용되어 지고 이외 대부분의 산업영역에 대해서는 모든 매개변수를 1로 두어 적용되어 진다.

CIE(TC 1-29)는 이 CIE94 색차식이 적어도 CMC 정도의 우수한 색차판정 성능을 가진다고 주장하며 1994년 개발 당시 표준색차식으로 추천하였다[6,8].

2.3.4. LCD 색차식

CIE94 색차식이 개발되어진 1994년 이후에도 학계와 산업계에서 기존 색차식의 비교 분석을 통한 보다 적합한 색차식의 개발 및 표준 실험 data set의 구축을 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다. 영국 Leeds 대학의 김동호와 Nobbs는 색차 시각판정 실험을 바탕으로 새로운 data set를 구축하고, 이 data와 BFD-perceptibility data set로부터 LCD 색차식을 도출하였다[14,15]. LCD 색차식은 CIE94 색차식의 가중함수를 변형한 수정되어진 버전이라고 할 수 있으며, CIELAB 색차식을 기반으로 하고 있다. LCD 색차식(ΔE_{LCD})을 다음 식 (9)에 나타내었다[14,15].

$$\Delta E_{LCD} = \left[\frac{(\Delta L^*_{ab}/S_L)^2}{K_L^2} + \frac{(\Delta C^*_{ab}/S_C)^2}{K_C^2} + \frac{(\Delta H^*_{ab}/S_H)^2 + S_R \Delta C^*_{ab} \Delta H^*_{ab}}{K_{CH}^2} \right]^{1/2} \quad (9)$$

Where)

$$S_L = 1 - 0.01L^*_{ab} + 0.0002L^*_{ab}{}^2 \quad \text{if } L^*_{ab} < 50$$

then $S_L = 1$

$$S_C = (1 + 0.045C^*_{ab})S_{CH}$$

$$S_H = (1 + 0.015C^*_{ab})S_{HH}$$

$$S_R = [-C^*_{ab} / (2 + 0.07C^*_{ab}{}^3)] \sin(2\Delta\theta)$$

and)

$$S_{CH} = S_{HH} = 1$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \{ -[(h_{ab} - 275) / 25]^2 \}$$

* $K_L = K_{CH} = 1$ for non-textile samples

$K_L = 1.5, K_{CH} = 1$ for textile samples

이 LCD 색차식은 BFD 색차식과 유사하며 색차 판정에 있어서 비슷한 성능을 나타낸다.

2.3.5. CIEDE2000 색차식

CIE94 색차식의 개발 이후, 당시 영국염색학회와 ISO에 의해 표준으로 규정되어 있던 CMC(l:c)[19] 색차식과 더불어 국제조명위원회는 CIE94[13] 색차식을 표준 색차식으로 제안하였다. 이 표준화 되어진 두 색차식은 각각 Luo-Rigg data와 RIT-Dupont data set으로부터 유도되어진 것으로서 Figure 4와 5에서 이 두 실험 데이터로부터 획득되어진 각 color center에 대한 색차의 허용범위(타원)를 확인 할 수 있다[6]. 이 data set는 CIELAB 색차식으로 계산되어진 어떤 color center에 대한 색차의 허용범위는 모두 구형이라는 측면에서 CIELAB 색차식의 문제점을 잘 지적하고 있었으며, 그에 따라 수정 CIELAB 색차식을 유도하는 결과를 가져오게 되었다.

그러나 각각의 이 두 data set을 기반으로 개발되어 표준색차식으로 제안되어진 CMC(l:c)와 CIE94 색차식은 blue 영역에서의 시각판정 실험 결과와 상당부분 불일치함이 확인되었다[6,7,20]. 이것은 CMC(l:c)와 CIE94 색차식에 의해 예상되어지는 색차허용타원은 모두 중심점을 향하고 있지만 시각판정 실험 데이터로부터 산출되어진 색차허용타원은 blue 영역에서 중심점을 향하고 있지 않기 때문이

다(BFD 색차식은 이러한 기존 색차식의 문제점으로 인해 색차허용타원에 대한 회전요소를 반영함으로써 개발되어졌다). 또한 두 색차식의 면밀한 비교 분석을 통하여 명도차의 판정에 있어서 매우 큰 불일치를 나타낸다는 것이 확인되어 졌다. 이것은 ‘색 공간에서 색차허용타원이 중심점에 가까워질수록 그 범위가 작아지기 때문에 결국은 구와 같은 색차허용체적을 나타낼 것이다’라고 기존의 모든 색차식이 예상한 바와 달리 실험 데이터에 의한 중심점 근처의 색차허용체적은 어느정도 배향성을 가지는 타원형으로 색차허용범위를 나타내고 있기 때문이다 (Figure 6). 즉, 표준 색차식으로 제안되어진 CMC(l:c)와 CIE94 색차식이 grey와 blue 영역에서의 색차판정에 있어서 적절하지 못하다는 평가를 받고 있다.

표준 색차식으로서 CMC(l:c)와 CIE94 색차식의 이러한 문제점을 해결하기 위해 CIE는 1998년 TC 147(CIE Technical Committee)를 조직하여 RIT-Dupont, Witt, Kim and Nobbs, BFD-perceptibility data의 통합 data set로부터 CIEDE2000 색차식을 개발하고 표준 색차식으로 제안하였다. 이 CIEDA2000 색차식은 다음 식 (10)과 같다[7,21].

$$\Delta E_{00} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{K_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)^2} + \sqrt{R_T \left(\frac{\Delta C'}{K_C S_C}\right) \left(\frac{\Delta H'}{K_H S_H}\right)} \quad (10)$$

where)

$$S_L = 1 + \frac{0.015(\bar{L} - 50)^2}{\sqrt{20 + (\bar{L} - 50)^2}}$$

$$S_C = 1 + 0.045 \bar{C}'$$

$$S_H = 1 + 0.015 \bar{C}' T$$

$$T = 1 - 0.17 \cos(\bar{h}' - 30^\circ) + 0.24 \cos(2\bar{h}')$$

$$+ 0.32 \cos(3\bar{h}' + 6^\circ) - 0.20 \cos(4\bar{h}' - 63^\circ)$$

$$R_T = -\sin(2\Delta\theta) R_C$$

$$\Delta\theta = 30 \exp \{ -[(\bar{h}' - 275) / 25]^2 \}$$

$$R_c = 2\sqrt{\frac{C'^{\overline{7}}}{C'^{\overline{7}} + 25^{\overline{7}}}}$$

and)

$$L' = L^*$$

$$a' = (1+G)a^*$$

$$b' = b^*$$

$$C' = \sqrt{a'^2 + b'^2}$$

$$h' = \tan^{-1}(b'/a')$$

$$\Delta H' = 2\sqrt{C'_s C'_b} \sin\left(\frac{\Delta h'}{2}\right)$$

s : standard, b : sample

$$G = 0.5\left(1 - \sqrt{\frac{C^{*\overline{7}}}{C^{*\overline{7}} + 25^{\overline{7}}}}\right)$$

$C^{*\overline{7}}$: average of C^*_{sb}

for sample pair

최근 CIE로부터 표준 색차식으로 제안되어진 이 CIEDE2000 색차식은 역시 CIELAB 색차식에 기반을 두고 있으며 CIELAB 색차식에 대해 다음의 5가지 인자를 수정함으로써 개발되어졌다: 1) S_L ; 명도 가중함수, 2) S_C ; 채도 가중함수, 3) S_H ; 색상 가중함수, 4) R_T ; blue 영역에서의 성능향상을 위한 채도차와 색상차 사이의 상호작용 요소(색차 허용타원의 회전요소), 5) $(1+G)$; grey 영역에서의 성능향상을 위해 CIELAB의 a^* scale을 재설계하기 위한 요소[6,7]. CMC($l:c$)와 CIE94 색차식은 위의 1)에서 3)까지 만의 인자를 고려하여 개발되어졌다. 따라서 CIEDE 2000 색차식은 기존의 두 표준 색차식의 blue와 grey 영역에 대한 문제점을 상당히 개선하였다고 판단되어진다. 또한 CMC($l:c$)와 CIE94 색차식을 비롯하여 기존 여러 색차식의 색상(S_H), 명도(S_L), 채도(S_C)에 대한 가중함수의 불일치와 모순되는 점을 비교 분석함으로써 보다 적합한 가중함수를 도입하여 매우 향상되어진 성능을 나타낸다고 평가되고 있다. 실제로 Figure 7을 통해 RIT-Dupont와 BFD data set에 대한 CIEDE2000

색차식의 우수한 색차판정 성능을 확인할 수 있다 [6].

3. 결 론

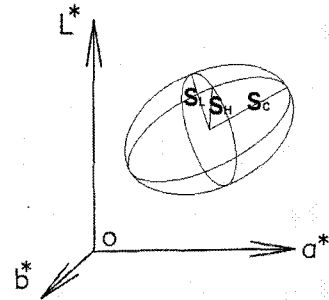


Figure 2. 색차허용타원체.

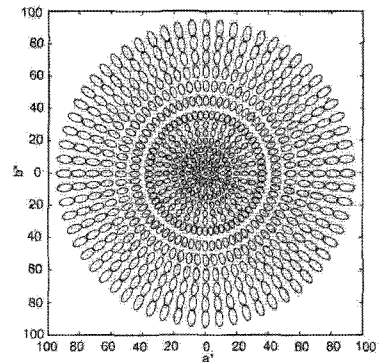


Figure 3. CMC(1:1) 색차식에 상응하는 색차허용타원의 거동.

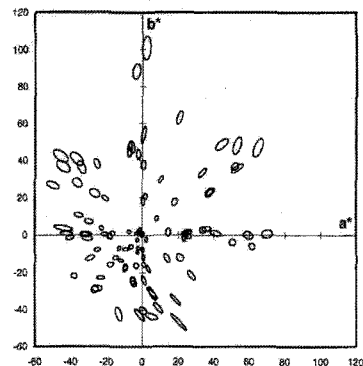


Figure 4. CIELAB a^*b^* diagram에서의 Luo-Rigg의 data set의 색차허용타원의 거동.

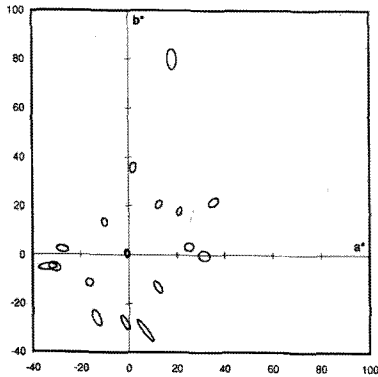


Figure 5. CIELAB a*b* diagram에서의 RIT-Dupont data set의 색차허용타원의 거동.

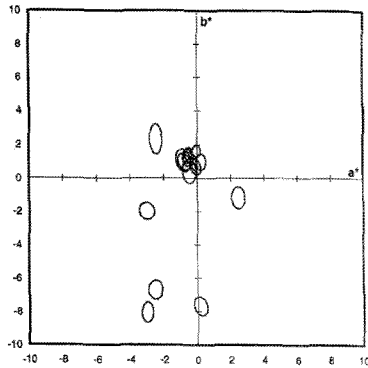


Figure 6. CIELAB a*b* diagram의 neutral point 근처에서 BFD, Leeds, RIT-Dupont, Witt data set에 의해 산출되어진 색차허용타원의 거동.

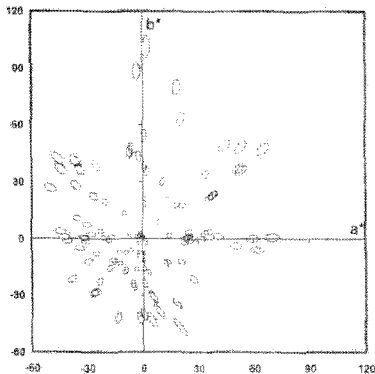


Figure 7. BFD, RIT-Dupont data set에 의해 산출되어진 색차허용타원과 CIEDE2000 색차식으로부터의 색차허용 타원 비교.

앞서 설명한 바와 같이 색채의 수치적 표현을 통한 객관적이고 효율적인 색차의 판정 및 표준화를 위해 학계 및 산업계에서 오랜 연구와 노력이 이루어져 왔다. 그 결과 보다 우수한 색차식의 개발을 목표로 광범위한 실험 데이터가 구축되어 왔고, 이를 바탕으로 수많은 색차식이 유도되어 졌으며, 기존 색차식의 비교 분석을 통해 최근에는 매우 향상된 색차판정 성능을 나타내는 CIEDE2000 색차식이 개발되는 등의 발전을 이룩하게 되었다.

그러나 실험적인 데이터를 바탕으로 우수한 성능을 나타내는 CIEDE2000 색차식이 실제 섬유·염색산업에 적용되어 실험 결과와 같은 매우 향상된 색차평가 성능을 나타낼 수 있는지는 아직 검증되지 않은 상태이다. 또한, 완벽하게 표준화 되어질 수 있는 정확한 색차식의 개발 및 그 경계가 모호하다는 측면에서 아직까지 색차식이 실제 섬유·염색산업에 적용되기에는 다음과 같은 많은 문제점을 가지고 있다.

3.1. 표준색차식으로 어떤 색차식이 적절한가?

국제 조명위원회는 1994년 표준색차식으로 CIE94를 추천하였으나 이에 반해, 영국염색학회의 측색위원회는 CMC색차식이 현재까지 표준색차식으로서의 역할을 잘 해내고 있으며, 이미 섬유 염색업계에서 광범위하게 사용되고 있음을 들어 표준색차식을 새로이 바꿀 필요가 없다는 입장이다. 또한 최근 CIE에 의해 제안되어진 CIEDE2000 색차식 역시도 그 성능이 검증되지 않은 상태에서 실제 산업에 적용하기에는 위험 요소가 많다는 것이다. 따라서 현재 섬유산업계에서는 색차 계산 시 어떤 식을 사용할 것인지 약간의 혼란이 있는 상태이다. 이에 각 식의 성능을 객관적으로 비교, 평가하여 표준색차식을 정해야 한다는 요구가 학계 및 산업계에서도 대두되었다. 각 색차식들은 그 색차식의 개발과 관련된 특정 데이터 조합에 각각 최상의 성능을 보이고 있으므로, 표준색차식을 정하기 위한 기존 색차식의 비교 분석을 위해서는 객관적이면서도 광범

위한 새로운 색차 데이터가 필요하다.

3.2. 색차평가에 영향을 주는 인자(광원, 배경색, 샘플간의 간격, 샘플크기, 텍스처 등)

보통 시관측 평가는 통제된 조건하에서 이루어지지만 실제로 색차를 인식하는데는 광원, 배경색, 샘플간의 간격, 샘플크기, 텍스처 등 규정되어진 조건이 외에도 수많은 인자들이 큰 영향을 미친다. 이러한 인자들의 영향까지 모두 고려하여 보다 더 다양한 색채 인지 현상을 모형화 한 것이 색채 현시 모형(colour appearance model)이다. 따라서 정확한 색차 계산에 있어 각 인자들이 색차를 인지하는데 어떠한 영향을 미치는지 체계적인 연구가 계속 행해져야 할 것이다.

3.3. 큰 색차의 샘플간에도 색차식이 잘 적용되는가?

기존의 색차식들은 모두 CIELAB, ΔE^*_{ab} 가 약 1 정도인 작은 색차의 샘플들에 대한 시관측평가 결과 데이터를 기초로 개발되었고, 색차의 크기와 시각의 비례성을 가정하여 큰 색차를 가지는 경우를 계산하고 있다. 따라서 작은 색차 계산에 있어서는 그 성능을 인정받은 상태이나, 아직까지 중간 색차나 큰 색차의 샘플에 대한 시관측평가 데이터가 많지 않기 때문에 이러한 색차크기의 영역에도 같은 성능을 보일지는 확실치 않은 상태이다. 즉, 샘플의 색차 크기 정도에 따라 인지되는 색차가 어떠한 체계적인 영향을 받을 수 있는지에 대한 연구가 필요하다.

4. 실제 섬유 염색 업체에서 제시하는 색차식의 문제점

염색 공장에서 실제 염색을 실시하는 컬러는 무궁무진하며 이는 우리가 특정한 red, blue, yellow 등으로 지칭할 수 없는 중간색 계열이 매우 많다. 이미 국내외적으로 CCM이 보급되면서 컬러에 관

한 체계적인 분석 및 정확한 매칭을 위한 기기 이용 등이 보편화되면서, 염색업체 사용자들은 컬러 수치화를 통한 색차식의 문제점을 토로하기 시작하였다. 그 중 가장 큰 문제는 명도가 매우 낮은 컬러인 dark color 염색물의 경우 실제로 눈으로 확인하면 색차가 확연히 보이는데도 불구하고 CIELAB나 CMC 색차식을 계산하면, 색차인 ΔE 값이 1정도도 나타나지 않는 문제이다. 이는 매우 dark한 color에서도 사람의 눈으로는 red한 느낌이나 blue한 느낌을 인식함에도 불구하고 색차식으로는 이를 계산해 내지 못한다는 문제이다. 이러한 기존 색차식의 문제점을 수정함으로써 개발되어진 CIEDE2000 색차식을 실제 산업현장에 적용하는 것이 대안이라고 생각되지만 실제 적용 시 실험 데이터에 대한 색차 판정 성능과 명확하게 비교 분석 되어져야 할 것이다.

색채에 대한 국내의 공학적 연구는 매우 미흡한 실정으로 색채교육도 디자인 요소로서의 심리적 색채 해석으로 치우치고 있다. 그러나 산업현장에서의 효율적인 색채관리 및 제품화를 통한 부가가치를 창출하기 위해서는 색채를 심리적으로 해석하기에 앞서 물리적, 공학적인 해석을 통한 전문적인 색채 지식의 기반이 매우 중요하다고 하겠다. 따라서 이러한 색채에 대한 공학적인 연구와 전문적 지식을 바탕으로 앞서 설명한 색의 수치적 표현 및 기존 색차식의 문제점을 규명하여 산업현장에서의 색채의 표준화, 원활한 컬러 커뮤니케이션 및 효율적인 색채관리 시스템의 개발에 대한 노력이 요구되고 있다.

참고문헌

1. F. W. Billmeyer, M. Saltzman, "Principles of Color Technology", 2nd Eds., John Wiley & Sons Ltd., 1981.
2. F. Grum, C. J. Bartleson(Ed.), "Optical Radiation Measurements", Vol.2 : Color Measurement, Academic, London, 1980.
3. R. S. Hunter, R. W. Harold, "The Measurement of Appearance", 2nd Eds. Wiley, 1987.
4. "Colorimetry", 2nd Eds, CIE Publication No.15-2 (Paris, Central

- Bureau of the CIE)(1986).
5. K. McLaren, B. Rigg, Publications sponsored by the society's colour measurement committee, *J. S. D. C.*, **92**, 337-338(1976).
 6. M. R. Luo, Development of colour-difference formulae, *Review of Progress in Coloration and related Topics*, **32**, 28-39(2002).
 7. M. R. Luo, G. Cui, B. Rigg, The Development of the CIE 2000 Colour-Difference Formula : CIEDE2000, *Col. Res. Appl.*, **26**, 340-350(2001).
 8. B. Rigg, Colour-difference formula recent developments, *Coloration Technology*, **111**, 267-271(1995).
 9. F. J. J. Clarke, R. McDonald, B. Rigg, Publications sponsored by the society's colour measurement committee, *J. S. D. C.*, **100**, 128-132, 281-282(1984).
 10. M. R. Luo, B. Rigg, BFD(l:c) colour difference formula, *J. S. D. C.*, **103**, 86-94(1987).
 11. M. R. Luo, B. Rigg, BFD(l:c) colour difference formula, *J. S. D. C.*, **103**, 126-132(1987).
 12. R. McDonald, K. J. Smith, CIE94 - an ew colour-difference formula, *J. S. D. C.*, **111**, 376-379(1995).
 13. "Industrial Colour-Difference Evaluation", *CIE Publication 116-1995* (Vienna, CIE)(1995).
 14. D. H. Kim, E. K. Cho, J. P. Kim, Evaluation of CIELAB-Based Colour-Difference Formulae Using a New Dataset, *Col. Res. Appl.*, **26**, 369-375(2001).
 15. D. H. Kim, J. H. Nobbs, *Proc Colour 97 Kyoto*, **1**, 446-449(1997).
 16. D. Heggie, R. H. Wardman, M. R. Luo, A comparison of the colour-differences computed using the CIE94, CMC(l:c) and BFD(l:c) formula, *J. S. D. C.*, **112**, 264-268(1996).
 17. Manuel Melgosa, Testing CIELAB-Based Colour-Difference Formulas, *Col. Res. Appl.*, **25**, 49-55(2000).
 18. R. McDonald, Industrial pass/fail colour matching, *J. S. D. C.*, **96**, 486-497(1980).
 19. "Test for colour fastness - Part J03:Calculation of colour differences", *ISO 105 - J03 ; 1995 Textiles* (Geneva ; ISO)(1995).
 20. M. R. Luo in "Colour Imaging ; Vision and Technology", Eds. L. W. McDonald and Luo, John Wiley & Sons Ltd., 1999.
 21. "Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation", *CIE Publication 142-2001* (Vienna, CIE)(2001).

저자 프로필



김삼수

1985. 영남대학교 섬유공학과 졸업
 1987. 영남대학교 섬유공학과(석사)
 1992. 서울대학교 섬유공학과(박사)
 1993. 한국생산기술연구원 섬유기술실용화 센터(선임연구원)
 1997. 일본경도공예섬유대학(Post-Doc.)
 1993-현재. 영남대학교 섬유패션학부 섬유소재가공전공 교수
 (712-749) 경북 경산시 대동 214-1
 Tel : 053-810-2784, Fax : 053-810-4684
 e-mail : sskim@yu.ac.kr



홍민기

2005. 영남대학교 섬유공학과 졸업
 2005. 영남대학교 섬유공학과 재학중
 (712-749) 경북 경산시 대동 214-1
 Tel : 053-810-3897, Fax : 053-810-4684
 e-mail : mall555@yumail.ac.kr