

<研究論文(學術)>

수정 CIELAB 색차식을 위한 새로운 색차 가중 함수

김 동 호

(재) 한국색채연구소 색채표준화연구/교육팀
(1997년 8월 14일 접수)

New Weighting Functions for the Modified CIELAB Colour-Difference Formulae

Dong-Ho Kim

KCRI(Korea Color Research Institute) 16-2, Yoido-dong, Youngdeungpo-ku SEOUL (150-010), Korea
(Received August 14, 1997)

Abstract—The lightness, chroma and hue tolerances with respect to the standard colour position in the CIELAB space have been studied in detail using the various existing data sets and the set from this study. The lightness tolerance showed a clear dependency upon the metric lightness for medium to light colours, but in the case of dark colours there was a discrepancy between the data sets. Both the chroma and hue tolerances showed dependency upon both the chroma and hue-angle and not the single dependency upon the metric chroma, as assumed in the CIE94 formula.

New weighting functions were derived from the above experimental evidence, and finally a new formula, LCD(Leeds Colour Difference) was proposed. The LCD formula is nearly as simple and flexible as CIE94 but smoothes the individual weighting functions, especially for lightness tolerances for light colours and chromaticity discrimination near the blue region.

1. 서 론

1994년, 국제조명위원회(CIE ; Commission International de l'Eclairage)는 새로운 색차식 CIE94를 추천하였다¹⁾. CIE94는 실제로 영국 염색학회(SDC ; Society of Dyers and Colourists, U.K.)의 측색분과위원회(CMC ; Colour Measurement Committee)에서 개발한 CMC($\ell : c$) 색차식²⁾을 단순화한 형태이다. CMC 색차식은 특히 염색 공장 등

에서 색의 허용차 관리(colour tolerance control)에 광범위하게 사용되어 왔고, 지금은 섬유 염색물의 색차 계산에 관한 ISO 표준으로 지정되었다³⁾. CIE94는 CMC와 다음의 두가지 주된 차이점이 있다. 첫째, 명도차의 계산에 있어서 가중 함수(weighting function)를 사용하지 않는 점, 둘째, 색상차의 계산에 있어서 색상 각도에 따른 차이(hue-angle dependency)를 고려하지 않는 점이다. 이같은 차이는 색차식 개발시에 동일하지 않은 시관측 조건,

시료 등의 사용에 기인하는 것으로 생각된다.

최근에 필자는 CIELAB 색공간에서 각각 명도차, 채도차, 색상차 성분의 색차 가중 함수 및 이들 허용치의 관측 조건에 따른 변화를 체계적으로 연구, 조사하는 실험을 완결한 바 있다⁴⁾. 이 논문에서는 수정(modified) CIELAB 색차식에 이용 가능한 새로운 색차 가중 함수의 개발 및 그 평가 결과를 기술하고자 한다.

2. 새로운 색차 가중 함수의 정의

개개 색차 성분에 기초하여 행한 간단한 시험 테스트 결과⁴⁾에 의하면, 기존의 3가지 수정 CIELAB 색차식(CMC, BFD⁵⁾, CIE94)의 성능은 서로 간에 매우 유사한 것으로 밝혀졌다. 따라서 일반적으로 이들 색차식을 원래 형태 그대로 사용해도 무리가 없을 것으로 생각된다. 실질적으로 CIE94 색차식이 선호될 것인데, 이는 가상 단순한 형태를 띠고 있으면서도 비교적 양호한 성능을 나타내고 있기 때문이다. 그러나 몇몇 경우, CIE94에 의한 색차 허용 범위(colour tolerance volume) 예측에는 심각한 오류가 있는 것으로 밝혀졌다: 첫째, 명도차 허용치는 어느 정도 목표색(표준색)의 명도 좌표 의존성을 보이고 있다. 고명도 색의 경우, 명도차 허용치는 분명히 명도 좌표(L^*_{std})에 따라 증가하는데, CIE94는 명도 좌표에 관계없이 일정한 명도차 허용치를 가정하고 있다. 둘째, 채도차 및 색상차 허용치는 동일한 채도의 두색 사이에서도 두배 이상 차이날 수 있는데(색상 각도 의존성), CIE94는 색상 각도 의존성을 가정하고 있지 않다. 셋째, 파란색 계통 색의 색차 허용 타원(chromaticity ellipse)은 채도차 방향—즉 원점과 표준색을 연결하는 직선 방향—에서 명백히 벗어나(회전되어) 있는데, CMC와 마찬가지로 CIE94 또한 색차식 자체에 이 점을 반영할 수 있는 별도의 계산항이 포함되어 있지 않다.

CIE94의 가장 큰 장점 중의 하나는 식 자체가 단순하다는 것이다. 단순함에 기인하는 유연성은 관측 조건의 변경에 따른 인자(parametric factor)를 색차식 내에 쉽게 대입할 수 있게 한다. 따라서 새로운 색차식을 CIE94의 형태와 유사하게 정의하였

고, 이때 이 새 색차식은 대부분의 면에서 CIE94와 호환성이 있고 CIE94 처럼 단순하지만 CIE94보다 더 나은 성능을 보일 것으로 기대하였다. CIELAB 색공간에 기초한 타원체(ellipsoid) 색차식의 형태는 일반적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다:

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

S_L , S_C , S_H 는 각각 명도차, 채도차, 색상차를 보정하는데 사용되는 색차 가중 함수이다. S_R 은 색차 허용 타원의 회전을 가능케 하려고 도입된 함수이다. K_L , K_{CH} 는 각각 관측 조건에 따른 명도차, 색도(색상 및 채도) 차의 변경 인자이다.

세가지 면에서 식(1)의 성능을 CIE94에 비하여 향상시키려는 노력이 있었다.

m) 명도차 허용치(S_L 함수), m') 채도차 및 색상차의 색상 각도 의존성(S_C , S_H 함수), 그리고 m'') 색차 허용 타원의 회전(S_R 함수).

2.1 명도차 가중 함수

CMC 및 BFD 색차식의 명도차 가중 함수의 기초이며, 각저명도 색의 명도차 시각 판정 결과를 포함하고 있는 유일한 데이터인 Fong 데이터를 검토해 보면, 중간 이하 어두운 색의 ($L^* < 50$) 명도차 허용치는 일반적으로 중간 이상의 밝은 색($L^* \geq 50$)에 비해 작은 것을 알 수 있다(Fig. 1). 그러나 Fong

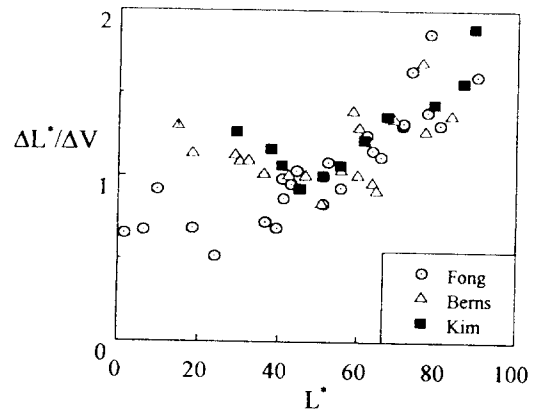


Fig. 1 Unit visual lightness differences

데이터를 매우 조심스럽게 조절된 관측 조건하에서 얻어졌고 따라서 자기완결적인 다른 두 데이터(Berns⁷⁾와 Kim⁴⁾)와 비교해 보면 서로 상호간에 일치하지 않음을 알 수 있다. 이들 두 데이터에서 시각 판정시 어두운 색의 명도차 허용치는 중간 정도의 명도 ($L^* \leq 50$)를 갖는 색의 명도차 허용치에 비해 크게(비록 가장 큰 명도차 허용치는 밝은 색의 경우에 더 분명하지만) 나타나고 있다. Fong 데이터의 개개 데이터 값(명도차 허용치, lightness tolerance)은 단순히 한 색차쌍(colour-difference pair)만을 사용되어 얻어졌고, 따라서 이들 데이터 값(특히 극저명도에 대한 값)의 유효성은 의문시된다.

이와 같이 모순되는 두 경우에 대한 일종의 타협점으로 명도차 가중 함수 S_L 을 중간 이하의 명도를 갖는 색($L^*=0 \sim 50$)에 대해서는 일정하게 (=1) 정하였고, 중간 이상의 명도를 갖는 색($L^*=50 \sim 100$)에 대해서는 L^* 의 2차 다항식으로 정의하였다 (Fig. 2).

$$S_L = 1 - 0.01L^* + 0.0002(L^*)^2, \quad L^* < 50 \text{인 경우 } S_L = 1 \quad (2)$$

이 같은 제안은 새로운 색차 가중 함수를 가능한 한 CIE94와 호환성 있게 하려는 것이다. 즉, 식(2)는 $L^* \leq 50$ 인 색상에 대해서는 CIE94 S_L 함수와 동일하다.

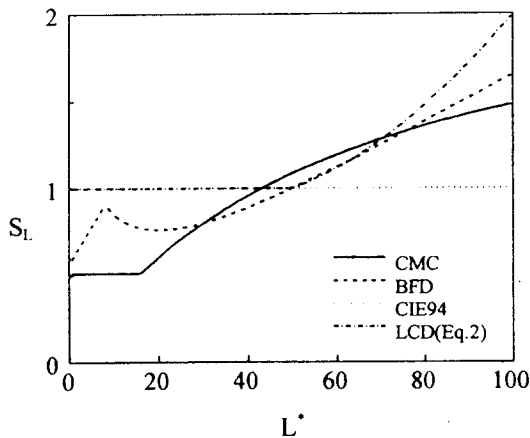


Fig. 2 Lightness weighting functions

2.2 채도차 및 색상차 가중 함수

원래의 CIE94의 채도차 및 색상차 가중 함수 S_C 와 S_H 는 다양한 범위의 표준색 위치(특히 표준색의 색상 각도)에 대한 채도차 및 색상차 허용치를 나타내는데 부적합한 것으로 생각된다. 따라서 세가지 데이터(Luo⁸⁾, Berns⁶⁾, and Kim⁴⁾)를 재검토하여 구한, 색상 각도에 따라 변화하는 S_{CH} 및 S_{SH} 함수를 S_C 및 S_H 함수의 정의에 포함시켰다(Fig. 3, 4; 여기서 N_C 와 N_H 는 각각의 데이터가 평균 색차 허용치를 갖게 만드는데 사용된 상수). 새로운 S_C 및 S_H 함수의 형태는 다음과 같다:

$$S_C = (1 + 0.045C^*)S_{CH} \\ S_H = (1 + 0.015C^*)S_{SH} \quad (3)$$

여기서

$$SCH = 1 + 0.07\sin(h) - 0.16\cos(2h + 250) \\ - 0.05\cos(3h) - 0.03\cos(4h) \\ SHH = 1 - 0.03\cos(h + 60) + 0.12\cos(2h) \\ + 0.12\cos(3h) - 0.07\cos(4h - 45) \\ C^*_{std} \leq 4 \text{인 경우 } S_{CH} = S_{SH} = 1 \quad (4)$$

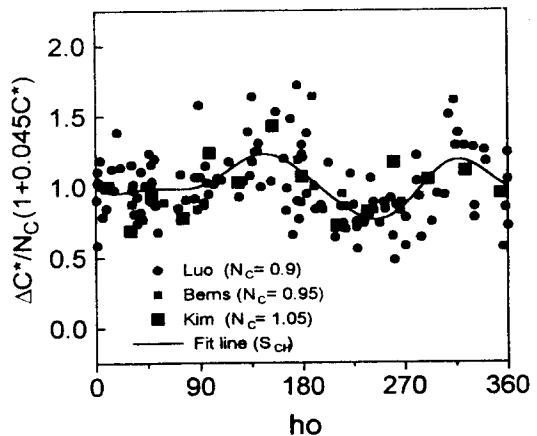


Fig. 3 Hue-dependence of chroma differences.

2.3 색차 허용 타원의 회전 함수

색차 허용 타원의 회전 함수 S_R 은 식(5)로 정의하였다(S_R 을 유도하는 자세한 과정은 Kim⁴⁾ 참조).

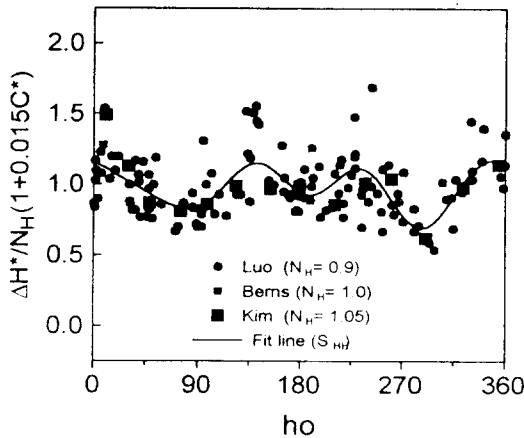


Fig. 4 Hue-dependence of hue differences.

함수(따라서 S_R 함수)의 값은 파란색 계통의 색을 제외하고는 0이기 때문에(Fig. 5; 여기서 $-t$ 는 개개 데이터에서 색차 허용 타원들의 평균 회전 각도), 식(1)의 형태는 실질적으로 파란색 계통 색을 제외하고는 CIE94와 동일하다.

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

여기서 $\Delta\theta = 30 \exp\{-[(h-275)/25]^2\}$ (5)

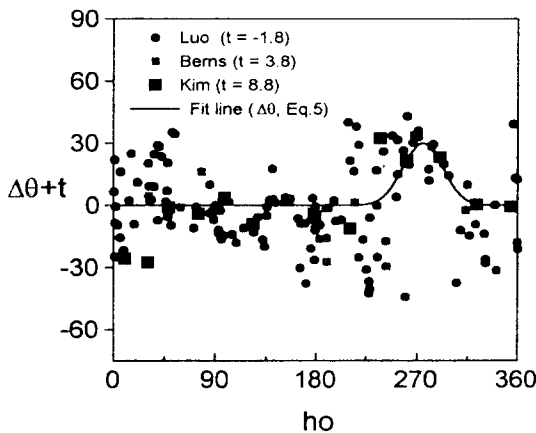


Fig. 5 Ellipse rotation($\Delta\theta$) as a function of hue-angle (h).

3. 새 색차 가중 함수의 테스트

CIE94의 색차 가중 함수를 체계적으로 수정했을 때의 각 경우에 대하여 색차식의 성능 향상 여부를

시험하였다. 즉 CIE94에 새 가중 함수를 추가하거나 기존의 가중 함수에 도입함으로써 다음의 7가지 색차식 모형(CDM; Colour-Difference Model)을 얻었다:

- CDM-1) CIE94 + S_L : CIE94의 명도차 가중 함수를 식(2)로 교체
- CDM-2) CIE94 + S_{Ch} , S_{III} : 색상 각도 의존 함수-식(4)-를 CIE94 채도차 및 색상차 가중 함수에 도입
- CDM-3) CIE94 + S_R : 파란색 계통 색에 현저한 색차 허용 타원의 회전을 반영할 수 있는 항-식(5)-의 추가
- CDM-4) CIE94 + S_L , S_{Ch} , S_{III}
- CDM-5) CIE94 + S_L , S_R
- CDM-6) CIE94 + S_{Ch} , S_{III} , S_R
- CDM-7) CIE94 + S_L^t , S_{Ch} , S_{III} , S_R

Table 1에 정리한 5가지 색차 데이터를 색차식 성능 시험에 사용하였다. Table 2에서 보던 첫째로 색차식의 성능은 해당 색차식을 개발하는데 사용된 특정 색차 데이터에 크게 의존함을 알 수 있다. 즉 BFD 및 CIE94 색차식은 각각 Luo 및 Berns 데이터에 대하여 최상의 성능을 보이고 있다(Luo 데이터에 대한 BFD(1:1) 색차식의 PF/4 값은 21%이다).

세가지 수정 CIELAB 색차식(CMC, BFD, CIE94)들은 ℓ (또는 K_L) 값을 섬유의 경우 1.5, 페인트의 경우 1.0으로 고정하고 테스트했을 경우 상호간에 매우 유사한 성능을 나타내었다. ℓ 값을 최적화시키는 것이 항상 가능하지 않다는 사실을 고려할 때 이들 세 색차식 간에는 사실상 뚜렷한 성능 차이가 없는 것으로 생각된다.

수정 CIELAB 색차식의 최적 ℓ 값은 또한 시험하고자 하는 특정 데이터 자체의 구조에 따라서도 차이가 난다. Luo 데이터의 경우, 원래 채도차 및 색상차 허용치 조사를 위해 준비되었기 때문에 데이터 내의 거의 대부분의 색차쌍들은 채도차 및 색상차를 나타내고 명도차를 나타내는 색차쌍은 매우 적다. 이것이 바로 Luo 데이터가 Cheung 또는 Kim-2 (gap) 데이터와 비교하여 현저히 다른 ℓ 값(1)이

Table 1. Five data sets used in testing new weighting functions.

Data Set	Luo	Berns	Kim-1	Cheung	Kim-2	Total
Substrate	Textile	Paint	Paint	Textile	Paint	—
No. Col. Cnt.	≅ 70	19	21	5	21	—
No. Pairs	533	163 ^(c)	244	317	203	1460
Measure ^(a)	PF/4	TSD	PF' /3	PF' /3	Pf' /3	—
ℓ (or K_L) ^(b)	1.5	1.0	1.0	1.5	1.5	—
Ref.	9	7,10	(d)	11	(e)	—

(a) PF or PF, and TSD : Performance factors⁵⁾, and tolerance standard deviation¹⁰⁾, respectively. With an ideal formula, these measures should be 0.

(b) Default value used in Table 2-a, i.e., $\ell = 1.5$ for textile and $\ell 1.0$ for paint samples.

(c) Number of tolerance vectors.

(d), (e) Both from Kim's study⁴⁾ under the grey background and the gap conditions, respectively.

The gap(Kim-2) data is regarded as pseudo-textile data, and ℓ is set to 1.5.

필요한 이유로 생각된다.

Tbale 2는 또한 CIE94의 색차 가중 함수를 교체하거나 CIE94에 새 색차 가중 함수를 추가하였을 때 성능이 크게 향상될 수 있음을 나타내고 있다.

명도차 허용치의 명도 의존성은 어두운 색의 경우 일정치 않을 수도 있지만 중간 이상의 밝은 색의 경우 뚜렷한 경향을 보이고 있다. 밝은 색 ($L^* > 50$)의 명도차 허용치는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 중간 이하의 어두운 색 ($L^* \leq 50$)에 비해 분명히 크다. CIE94의 명도차 가중 함수(S_L)는 이같은 기존의 실험 결과를 무시, 목표색의 명도에 관계없이 일정하게 정의되어 있고 따라서 노란색 또는 흰색에 가까운 회색과 같이 고명도 색에 대한 명도차 허용치 예측에 있어 심각한 오류를 범하고 있다. 필자가 준비한 명도차 쌍이 전체에서 차지하는 비율이 상대적으로 큰 2가지 데이터의 경우, CIE94의 S_L 함수를 식(2)의 새로운 S_L 함수로 교체하면 성능 향상이 상당히 크다는 것을 확인하였다. Luo 데이터의 경우, S_L 함수 교체로 인한 CIE94 색차식의 성능 변화가 없는 이유는 앞서 설명한 바와 같이 데이터 구조 자체에 기인하는 것이라 할 수 있다.

색상차 허용치(그리고 또한 채도차 허용치)의

색상 각도 의존성 여부는 표준색의 수가 충분한, 즉 다양한 색상 각도의 표준색을 포함하는, 색차 데이터로 시험해야 할 것이다. 약 70개 표준색을 포함하는 Luo 데이터의 경우, 색상 각도 의존 함수를 CIE94의 S_C, S_H 함수에 도입하고 색차 허용 타원의 회전 함수를 CIE94에 추가할 시에(CDM-6), 해당 색차식 모형의 성능이 분명히 향상되었다. 다른 데이터의 경우에 별다른 성능 차이를 감지할 수 없는 이유는 표준색의 수가 부족하기 때문으로 설명할 수 있다. 단지 19개 만의 표준색을 포함하고 있는 데이터로 색차식의 성능을 시험하고, 이로부터 색상 각도 의존성이 없다는 주장¹²⁾은 정당화될 수 없다.

Luo 데이터를 제외한 나머지 데이터에 대하여 CDM-5 색차식 모형이 CIE94 색차식 보다 현저히 양호한 성능을 나타내는 점에 주목할 필요가 있다. 기존의 3가지 가중 CIELAB 색차식과 비교해 보면 CDM-5는 두번째로 간단한 형태이다. 가장 복잡한 형태인 CDM-7은 CDM-5에 비해 단지 Luo 데이터에 대해서만 더 좋은 성능을 보여 주었다. 이것은 비록 색상 각도 의존성이 존재할 가능성은 있지만, 색상 각도 의존성을 반영할 수 있는 항을 기존의 수정 색차식에 추가함으로써 발생하는 부가적인 복잡성에

Table 2. Performance testing results of colour-difference formulae in predicting five different data sets. [The tabulated values represent the % disagreement between true visual differences and calculated differences(from a particular formula), and thus the smaller the value, the better the formula.]

(a) With default ℓ values ($\ell=1.5$ for textile, and $\ell=1.0$ for paint samples)

Formula	Data Set					Overall
	Luo	Berns	Kim-1	Cheung	Kim-2	
CIELAB	47	36	53	45	55	48
CMD	29	28	32	31	34	31
BFD	27	25	33	29	38	30
CIE94	26	21	36	34	38	30
CMD-1	26	20	33	30	34	—
CMD-2	24	21	36	35	39	—
CMD-3	24	20	36	33	37	—
CMD-4	24	20	33	32	36	—
CMD-5	25	18	32	29	33	27
CMD-6	22	19	35	32	37	—
CMD-7	22	18	32	29	34	26

(b) With optimised ℓ values

Formula	Data Set					Overall
	Luo	Berns	Kim-1	Cheung	Kim-2	
	ℓ	ℓ	ℓ	ℓ	ℓ	
CMC	1.0 26	1.0 28	1.0 32	1.4 31	1.2 33	29
BFD	0.8 20	0.7 21	0.8 30	1.2 28	1.0 32	25
CIE94	1.4 26	1.1 21	1.3 34	2.0 31	1.7 37	29
CDM-5	1.2 24	1.0 18	1.1 30	1.8 28	1.4 33	26
CDM-7	1.3 21	1.0 18	1.1 31	1.6 29	1.3 34	26

비하여 실제 얻게 되는 성능 향상은 그리 크지 않음을 의미한다.

최적 ℓ 값을 사용하였을 때, BFD 색차식의 성능이 최상인 것을 확인하였다. 아마도 전체 색차 테스트 데이터 중에 Luo 데이터로부터 선택된 것이 1/3 이상인 사실 때문인 것으로 생각된다. CDM-5 색차식 모형이 CMC 나 CIE94 보다 명백히 우수한 성능, 그리고 BFD에 거의 필적한 성능을 나타낸 점은 매우 고무적이다.

4. LCD-새로운 가중 CIELAB 색차식

앞에서 고찰해 본 색차식 성능 시험 결과에 기초해서 CDM-5를 최종적으로 새로운 수정 CIELAB 색차식 LCD(Leeds Colour Difference)로 제안하였다. LCD 색차식은 다음과 같다.

$$\Delta E_{LCD} = \left[\frac{(\Delta L/S_L)^2}{K_L^2} + \frac{(\Delta C/S_C)^2 + (\Delta H/S_H)^2 + S_R \Delta C \Delta H}{K_{CH}^2} \right]^{1/2} \quad (6)$$

$$\begin{aligned}
 \text{여기서 } S_L &= 0.01L^* + 0.0002(L^*)^2, L^* < 50 \text{의 경우} \\
 S_L &= 1 \\
 S_C &= (1 + 0.045C^*) S_{CH} \\
 S_H &= (1 + 0.015C^*) S_{HH} \\
 S_R &= [-C^*/(2 + 0.07C^*)^3] \sin(2\Delta\theta)
 \end{aligned}$$

그리고 $SCH = SHH = 1$

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

섬유 시료의 경우 : $K_L = 1.5, K_{CH} = 1$

일반 용도 사용시 : $K_L = K_{CH} = 1$

L^*, C^*, h 는 쌍으로 되어 있는 두 시료 중에 표준색(목표색)에 대한 값을 의미한다. 색차쌍 중에 표준색을 지정하기 어려운 경우에는, 두색 사이의 평균 L^*, C^*, h 값을 표준값으로 사용해도 무방하다.

5. 결 론

기존의 수정 CIELAB 색차식의 색차 가중 함수에 관하여 체계적인 연구를 수행하였고, 새로운 수정 CIELAB 색차식 LCD를 제안하였다.

LCD는 그 단순성과 유연성 면에서 CIE94와 비교되지만, 색차 가중 함수를 CIELAB 색공간 상에서의 표준색 위치, 특히 고명도 색의 명도차 허용치 및 파란색 계통 색의 채도차와 색상차 허용치, 에 대하여 매끄럽게 한 것이 특징이다.

최근의 문헌¹³⁾에 따르면, a^*b^* 색도 평면상에서 색차 허용 타원의 회전을 가능케 한 수정 CIELAB 색차식, 예를 들면 LCD 또는 BFD는 기기 측색에 기초한 견뢰도 시험에 특히 유용하다고 알려진 바 있다.

또한 CIE94는 단지 한 색차 데이터(Berns data)에 대해서만 최적화되어 개발되었지만, LCD 색차식(Table 2에서 CDM-5)은 기본 관측 조건을 달리해서

얻어진 데이터를 포함하여 5가지 다른 데이터에 대하여 시험한 후 개발되었다는 점을 지적하고자 한다.

참고문헌

1. CIE Publ. No.116, *Industrial Colour-Difference Evaluation*, CIE Central Bureau, Vienna, (1995).
2. F.J.J.Clarke, R.McDonald and B.Rigg., *J. Soc. Dyers Col.*, 103, 128 (1984).
3. ISO 105-J05, *Standard for Quantifying Small Color Differences for Textile Materials*.
4. D.H.Kim, *Ph.D. Thesis*, Univ. of Leeds, (1997).
5. M.R.Luo and B.Rigg. *J. Soc. Dyers Col.*, 103, 86, 126 (1987).
6. E.Coates, K.Y.Fong and B.Rigg, *J. Soc. Dyers Col.*, 97, 179 (1981).
7. R.S.Berns, D.H.Alman, L.Reniff, G.D.Snyder and M.R. Balonon-Rosen, *Color Res. Appl.*, 16, 297 (1991).
8. M.R.Luo and B.Rigg, *Color Res. Appl.*, 11, 25 (1986).
9. M.R.Luo, *Ph.D. Thesis*, Univ. of Bradford, (1986).
10. D.H.Alman, R.S.Berns, G.D.Snyder and W.A. Larsen, *Color Res. Appl.*, 14, 139 (1989).
11. M.Cheung, *Ph.D. Thesis*, Univ. of Bradford, (1984).
12. R.S.Berns, 7th Cong. *AIC COLOUR 93*, Budapest, Vol.B, 1993, C19.1-19.4.
13. T.Sato, N.Takada, M.Ueda, T.Nakamura and M.R.Luo, *J. Soc. Dyers Col.*, 113, 17 (1997).