

논문 2006-43SP-6-1

# RGBCMYK 성분의 XYZ 전광 변환 함수를 이용한 모바일 LCD의 특성화

## ( Mobile LCD Characterization using XYZ Electro-Optical Transfer Functions for RGBCMYK Components )

박 기 현\*, 권 오 설\*, 손 창 환\*, 하 영 호\*\*

( Kee-Hyon Park, Oh-Seol Kwon, Chang-Hwan Son, and Yeong-Ho Ha )

### 요 약

디스플레이 특성화 방법, 예를 들어 gain-offset-gamma (GOG) 모델 혹은 S-curve 모델에서는 일반적으로 디스플레이가 두 가지의 기본적인 특성, 즉 채널 색도 일관성과 채널 독립성을 가지고 있다고 가정한다. 하지만, 모바일 LCD의 경우, 이러한 가정은 잘 적용되지 않는다. 따라서 기존의 디스플레이 특성화 방법을 모바일 디스플레이에 적용하기 위해서는 부분적인 수정이 요구된다. 본 논문에서는 채널 색도 변화성에 기인하여 나타나는 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수의 차이를 고려하기 위해 각 채널당 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 전부 모델링하는 방법을 제안한다. 또한, 채널 상호작용에 기인하여 나타나는 채널 사이의 충분하지 않은 가산성을 보상하기 위해 채널간 성분, 즉 cyan, magenta, yellow, gray에 대해서도 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 전부 모델링하여 이용한다. 실험을 통하여, 제안한 특성화 방법이 채널 색도 변화 또는 채널 의존성을 고려한 다른 특성화 방법에 비하여 모바일 디스플레이에서의 색 자극 값을 더욱 정확히 예측한다는 것을 보여 주었다.

### Abstract

Most display characterization methods, such as the gain-offset-gamma (GOG) model and S-curve model, generally assume that displays have two fundamental characteristics, channel-chromaticity-constancy and channel-independence. However, these assumptions are not so applicable in the case of liquid crystal (LC)-based mobile displays. Accordingly, modifications are required to enable the application of conventional display characterization methods to mobile displays. Therefore, this study proposes the modeling of distinct EOTFs in terms of the X, Y, and Z values for each channel to consider the differences among the EOTFs resulting from channel-chromaticity-inconstancy. In addition, to overcome the poor additivity property among the channels due to channel-interaction, the proposed method also models and uses the EOTFs of the X, Y, and Z values for the inter-channel components cyan, magenta, yellow, and gray. Experimental results confirm that the mobile display color values predicted by the proposed characterization method are more accurate than those predicted by other characterization methods due to considering the channel-chromaticity-inconstancy and/or channel-dependence of the display.

**Keywords :** 디스플레이 특성화, 모바일 LCD, S-curve 모델, Masking 모델

### I. 서 론

최근 CRT, LCD, PDP, OLED 등의 상용 디스플레이

장치 기술이 두드러지게 발전하고 있다. 특히 소형화 및 경량화 된 디스플레이 장치가 휴대폰이나 PDA 등과 같은 모바일 장치에 탑재되고 있다. 하지만 일반 모니터와 비교했을 때 모바일 디스플레이는 작은 색역, 어두운 휘도, 소비전력의 한계로 인한 좋지 못한 칼라 충실도를 가진다. 따라서 모바일 디스플레이에 색을 비교적 정확히 표현하기 위해서는 칼라 운영 시스템이 요구된다. 이러한 칼라 운영 시스템을 디스플레이 장치에 적용하기 위해서는 장치 의존적인 디지털 입력 값과 장

\* 학생회원, \*\* 정회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 ( School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University )

※ 본 결과물은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과입니다.

접수일자: 2006년1월9일, 수정완료일: 2006년10월18일

치 독립적인 색 자극 값 사이의 관계를 규정하는 특성화 과정이 필수적이다.

최근 몇 년간 다양한 디스플레이 특성화 방법이 제안되고 발전되었다. Gain-offset-gamma (GOG) 모델<sup>[1]-[3]</sup>은 CRT와 같은 디스플레이의 지수적인 전광 변환 특성을 모델링 하기 위한 방법으로서 매우 잘 알려진 표준화된 방법이다. 단순한 방법이지만 red, green, blue 채널의 전광 변환 함수가 지수적인 모양이 나타나 CRT의 색 자극 값을 비교적 정확히 추정할 수 있다. 하지만 GOG 모델을 S자 모양의 전광 변환 함수를 갖는 LCD에 적용하는 것은 이들의 전광 변환 함수 모양의 차이 때문에 적합하지 않다. LCD에 적용을 위해 분자와 분모에 두개의 감마를 사용하여 S자 모양의 전광 변환 함수를 모델링 하는 S-curve 모델(버전 1)<sup>[4]-[6]</sup>이 제안되었다. 근본적으로 이 두 방법은 유사한 과정으로 이루어져 있다. 첫째는 채널 색도 일관성을 가정하고 red, green, blue 채널에 대해서 디지털 입력 값과 출력 휘도 값 사이의 관계를 선형화 하는 단계이고, 둘째는 채널 독립성을 가정하고 각 채널의 출력 색 자극 값을 이용해 선형 함수를 구하는 단계이다.<sup>[7],[8]</sup> 액정은 빛을 분광시키는 특성을 갖고 있기 때문에 LCD는 채널 색도 일관성이 완전히 성립되지 않는다. 따라서 이를 고려한 더 나은 모델링을 위해서 S-curve 모델(버전 2)<sup>[4]-[6]</sup>은 전광 변환 함수의 미분치를 이용하여 LCD의 채널 색도 변화를 모델링 하였다. 하지만 이러한 전광 변환 함수의 미분치는 각 채널의 색도 변화를 잘 모델링하지 못한다. LCD의 채널 색도 변화 특성에 대한 다른 접근으로서, 디스플레이의 디지털 입력 값과 출력 휘도 값 사이의 선형화 단계에서 9개의 전광 변환 함수를 모델링 하는 방법이 있다.<sup>[7]</sup> 하지만 이 방법을 사용하면 LCD의 채널 종속성에 대한 고려를 할 수 없다. 따라서 채널 상호작용으로 인한 색상 변화를 근사화하기 위해서 Masking 모델<sup>[9],[10]</sup>은 RGB 프라이어리 색 뿐만 아니라 cyan, magenta, yellow, gray를 이용하였다. 또한 채널 색도의 변화로 인한 오차를 최소화하기 위해서 이 모델은 CIEXYZ 벡터의 첫 번째 주성분으로부터 CIEXYZ 벡터를 구하고 이를 이용하였다. 하지만 3차원의 CIEXYZ 벡터를 단지 하나의 주성분 벡터를 이용해 표현하는 데는 한계가 있다. 또한 세 개의 주성분 벡터 모두를 이용하는 것은 직접 CIEXYZ 벡터를 이용하는 것과 비교해 볼 때 매우 비효율적이다.

따라서 본 논문에서는 채널 색도 변화 특성을 고려하기 위해서 각 채널의 X, Y, Z 값에 대해서 3개의 개별

적인 전광 변환 함수를 직접 모델링하는 방법을 제안한다. 또한 채널 사이의 상호 작용<sup>[11],[12]</sup>의 결과로 인한 좋지 않은 채널 독립 특성에 대해서는 Masking 모델과 유사하게 red, green, blue 프라이어리와 두 가지 이상의 프라이어리로 구성된 성분인 cyan, magenta, yellow, gray를 모델링하고 이를 이용한다. 실험 결과를 통하여 제안한 방법이 모바일 LCD의 영상에 대하여 색 자극 값을 추정함에 있어 다른 특성화 방법보다 더 좋은 성능 가진다는 것을 보였다.

## II. 채널 색도 일관성

GOG 모델 혹은 S-curve 모델로 디스플레이 특성화를 수행함에 있어 매우 중요한 가정 중의 하나가 채널 색도 일관성이다.<sup>[7],[8]</sup> 이 가정이 의미하는 것은 한 채널에서 발하는 광휘 스펙트럼의 모양은 일정한 기본 형태를 지닌다는 것이다. 이는 다음과 같이 디지털 입력 값과 파장의 함수로 나타낼 수 있다.

$$S_r(d_r, \lambda) = R(d_r)S_{r,\max}(\lambda) \quad (1)$$

$$S_g(d_g, \lambda) = G(d_g)S_{g,\max}(\lambda) \quad (2)$$

$$S_b(d_b, \lambda) = B(d_b)S_{b,\max}(\lambda) \quad (3)$$

여기서  $S_{p,\max}(\lambda)$ ,  $p=r, g, b$ , 는 red, green, blue 채널에서 가장 큰 디지털 입력 값을 인가했을 때 나타나는 출력 광휘 스펙트럼을 나타내고,  $P(d_p)$ ,  $P=R, G, B$ , 는 디지털 입력 값  $d_p$ 의 함수로 표현되며, 각 채널에서 기본 스펙트럼 광휘의 세기에 대한 가중치 값을 나타낸다. 여기서는 전광 변환 함수라 정의하며, 0과 1 사이의 값을 갖는다.

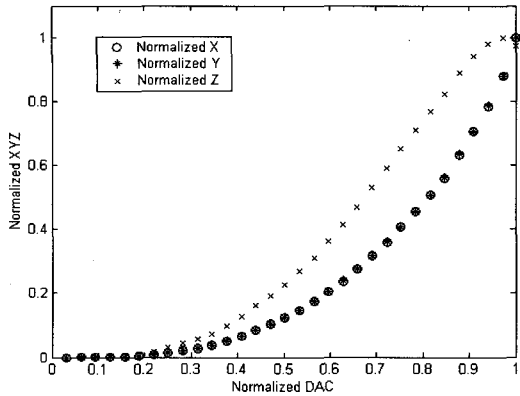
채널 색도 일관성은 또한 다음과 같이 광휘 스펙트럼을 칼라 매칭 함수로 곱하고 이를 파장에 대하여 적분한 결과인 CIEXYZ 삼자극치 형태로도 표현할 수 있다.

$$I_r(d_r) = R(d_r)I_{r,\max} \quad (4)$$

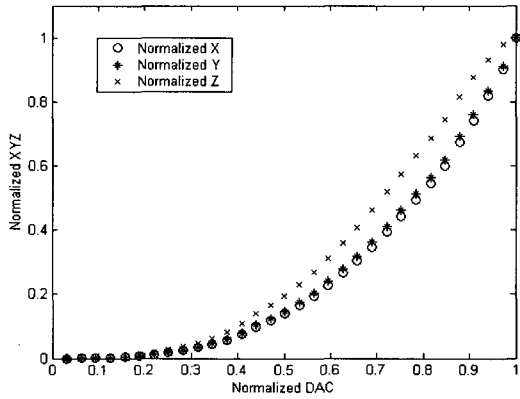
$$I_g(d_g) = G(d_g)I_{g,\max} \quad (5)$$

$$I_b(d_b) = B(d_b)I_{b,\max} \quad (6)$$

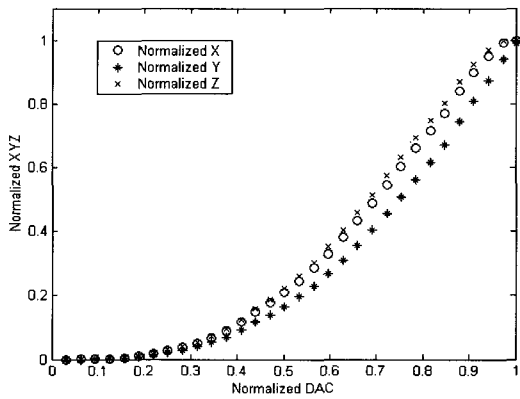
여기서  $I_p(d_p)$ ,  $I=X, Y, Z$ ,  $p=r, g, b$ , 는 디스플레이에



(a)



(b)



(c)

그림 1. 모바일 디스플레이의 각 red, green, blue 채널에 대한 X, Y, Z 값의 전광 변환 특성 (a) red 채널의 전광 변환 특성 (b) green 채널의 전광 변환 특성 (c) blue 채널의 전광 변환 특성

Fig. 1. Electro-optical transfer characteristics of X, Y, and Z values for red, green, and blue channel in mobile LCD; (a) electro-optical transfer characteristics for red channel, (b) electro-optical transfer characteristics for green channel, and (c) electro-optical transfer characteristics for blue channel.

입의 디지털 입력 값  $d_p$ 가 주어졌을 때 출력으로 나오는 빛의 CIEXYZ 값을 의미한다. 또한  $I_{p,max}$ 는 각 red, green, blue 채널에서 최대 디지털 입력 값이 주어졌을 때 출력으로 나오는 빛의 CIEXYZ 값이다.

하지만 그림 1에서 보이는 것처럼 LCD 모바일 디스플레이에 대한 측정된 X, Y, Z의 전광 변환 특성 곡선은 각 red, green, blue 채널에서 서로 다르게 나타난다. 만일 식 (4), (5), (6)에서처럼 채널별 X, Y, Z의 전광 변환 특성 곡선이 동일하다면, 디지털 입력 값이 변화더라도 X, Y, Z 값의 비가 일정하므로 채널의 색도가 변하지 않게 된다. 그림 1은 모바일 LCD에서는 채널 색도 일관성이 잘 성립되지 않는다는 것을 보여준다.

### III. 채널 독립성

채널마다 전광 변환 함수를 각각 모델링 하고, 입의 디지털 입력 값에 대한 색 자극 값을 구할 때 이것의 선형 합의 결과를 이용하는 디스플레이 특성화 모델에서 반드시 보장되어야 하는 디스플레이의 중요한 특성은 채널 독립성이다.<sup>[7],[8]</sup> 이 가정 하에 디스플레이 특성화는 red, green, blue 채널에 대해 개별적으로 전광 변환 함수를 모델링 하고 단순히 그것을 합산함으로써 수행될 수 있다. 채널 독립성에 대한 수학적 표현은 다음과 같다.

$$S_{rgb}(d_r, d_g, d_b, \lambda) = S_r(d_r, \lambda) + S_g(d_g, \lambda) + S_b(d_b, \lambda) \quad (7)$$

여기서  $S_{rgb}(d_r, d_g, d_b, \lambda)$ 는 디지털 입력 값  $d_r, d_g, d_b$ 에 대한 디스플레이의 출력 광휘 스펙트럼이다.  $S_r(d_r, \lambda), S_g(d_g, \lambda), S_b(d_b, \lambda)$ 는 각각 red, green, blue 채널에 대한 광휘 스펙트럼이다. 채널 독립성에 대한 식을 CIEXYZ 값과 관련지어 나타내면 다음과 같다.

$$I_{rgb}(d_r, d_g, d_b) = I_r(d_r) + I_g(d_g) + I_b(d_b) \quad (8)$$

여기서  $I_{rgb}(d_r, d_g, d_b), I = X, Y, Z,$ 는 디지털 입력 값  $d_r, d_g, d_b$ 에 대한 CIEXYZ 값을 나타낸다.  $I_r(d_r), I_g(d_g), I_b(d_b)$ 는 각각 red, green, blue 채널에 대한 CIEXYZ 값이다. 즉,  $I_r(d_r), I_g(d_g), I_b(d_b)$ 는 각각  $I_{rgb}(d_r, 0, 0), I_{rgb}(0, d_g, 0), I_{rgb}(0, 0, d_b)$ 을 의미한다.

하지만 채널 독립 특성은 표 1에서 보는바와 같이 모바일 LCD에서는 이상적이지 않다. 표 1은 red, green,

표 1. 혼합 색과 순수 색들의 합 사이의 색차  
Table 1. Color differences between mixed colors and sum of pure colors.

200 (6×6×6-16)개 패치	$I_{rgb}(d_r, d_g, d_b)$ 와 $I_r(d_r) + I_g(d_g) + I_b(d_b)$ 의 비교			
	$ \Delta X $	$ \Delta Y $	$ \Delta Z $	$\Delta E_{ab}$
평균값	2.81	3.07	2.80	3.29
최대값	9.99	11.33	10.62	7.81

blue 세 채널 중 두 채널 이상이 사용된 200개의 패치를 대상으로 패치 자체를 측정할 색 자극 값과 각 채널 별 패치를 측정할 색 자극 값의 합 사이의 X, Y, Z 및 CIELAB 색차에 대해 평균값과 최대값을 보여주고 있다. 모든 색은 RGB 육면체 색 공간에서 균일하게 분포하는 216(6×6×6)개 패치 중에서 선택되었다. 표 1에서 사용된 모든 측정된 색 자극 값은 최초 측정값에서 블랙 패치의 색 자극 값을 뺀 결과 값이다. 평균  $\Delta E_{ab}$  색차가 3보다 크고 최대  $\Delta E_{ab}$  색차가 7을 넘어 선 것을 볼 수 있다.

#### IV. 기존의 특성화 방법

##### 1. S-curve 모델

GOG 모델<sup>[1]-[3]</sup>은 CRT의 전광 변환 함수처럼 지수적인 특성을 지니는 디스플레이에 적합한 특성화 방법이다. 반면 S-curve 모델(버전 I)<sup>[4]-[6]</sup>은 대부분의 모바일 장치, TV, 모니터 등에 사용되는 LCD의 S자 모양의 전광 변환 함수를 모델링하기 위해 만들어진 특성화 방법이다. S-curve 모델은 GOG 모델과 같이 크게 두 단계로 구성된다. 첫째는 각 red, green, blue 채널에서 디지털 입력 값과 디스플레이 휘도 사이의 비선형적인 관계를 모델링하기 위한 모델링 함수를 획득하는 단계이고, 둘째는 각 red, green, blue 채널에 대하여 최대 디지털 입력 값이 주어졌을 때의 출력 CIEXYZ 색 자극 값을 원소로 가지는 3×3 행렬을 이용하여 디스플레이 휘도 값을 CIEXYZ 값으로 변환하는 단계이다. S-curve 모델에서 디지털 입력 값과 디스플레이 휘도 사이의 비선형적 관계를 모델링 하는 함수는 GOG 모델과는 다르게 다음과 같은 형태로 나타난다.

$$R(d_r) = A_r \frac{[d_r / (2^N - 1)]^{\beta_r}}{[d_r / (2^N - 1)]^{\beta_r} + E_r} \quad (9)$$

$$G(d_g) = A_g \frac{[d_g / (2^N - 1)]^{\beta_g}}{[d_g / (2^N - 1)]^{\beta_g} + E_g} \quad (10)$$

$$B(d_b) = A_b \frac{[d_b / (2^N - 1)]^{\beta_b}}{[d_b / (2^N - 1)]^{\beta_b} + E_b} \quad (11)$$

여기서  $d_r, d_g, d_b$ 는 각 red, green, blue 채널에 대한 디지털 입력 값이고  $N$ 은 비트수이다. 즉  $2^N - 1$ 은 최대 디지털 입력 값이 되며 다른 디지털 입력 값을 정규화하기 위해 사용된다.  $R(d_r), G(d_g), B(d_b)$ 는 각각 red, green, blue 채널에서 디지털 입력 값  $d_r, d_g, d_b$ 에 대응되는 정규화된 디스플레이 휘도 값이다.  $A_p, \alpha_p, \beta_p, E_p, p=r, g, b$ , 는 계산되어야 하는 모델 파라미터이다. 최적의 파라미터  $A_p, \alpha_p, \beta_p, E_p$ 를 추정하기 위해서 각 채널에서 등간격의 디지털 입력 값에 대한 32개의 패치를 만들어 CIEXYZ 값을 측정한다. 그리고 측정된 X 값은 red 채널, Y 값은 green 채널, Z 값은 blue 채널에서 채널의 정규화된 디스플레이 휘도 값을 정의하기 위하여 다음과 같이 사용된다.

$$R(d_r) = X_r / X_{r,max} \quad (12)$$

$$G(d_g) = Y_g / Y_{g,max} \quad (13)$$

$$B(d_b) = Z_b / Z_{b,max} \quad (14)$$

그 후에 최적화 과정을 통하여 최적의 파라미터  $A_p, \alpha_p, \beta_p, E_p$ 를 계산한다. 이때 패치에 대한 정규화된 디스플레이 휘도 값과 그에 따른 디지털 입력 값이 이용된다.

일단 전광 변환 함수가 모델링 되면, 최적의 파라미터로 구성된 채널별 모델링 함수를 이용해서 임의의 디지털 입력 값에 대한 채널의 정규화된 휘도 값을 추정할 수 있다. 마지막으로, 추정된  $R(d_r), G(d_g), B(d_b)$ 는 다음과 같은 식을 이용하여 CIEXYZ 값을 계산하게 된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R(d_r) \\ G(d_g) \\ B(d_b) \end{bmatrix} \quad (15)$$

여기서  $X_{p,max}, Y_{p,max}, Z_{p,max}, p=r, g, b$ , 값은 각 red, green, blue 채널에서의 최대 CIEXYZ 값이다.

또한 S-curve 모델(버전 II)은 채널의 색도의 변화를

고려하기 위하여 한 채널의 디스플레이 휘도 값을 다음과 같은 식을 이용하여 채널 자신의 성분 값과 다른 채널의 성분 값으로 나눈다.

$$\begin{bmatrix} R_p(d_p) \\ G_p(d_p) \\ B_p(d_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_p(d_p) \\ Y_p(d_p) \\ Z_p(d_p) \end{bmatrix} \quad (16)$$

for  $p = r, g, \text{ and } b$

여기서  $X_p(d_p)$ ,  $Y_p(d_p)$ ,  $Z_p(d_p)$ 는 red, green, blue 채널에서 디지털 입력 값  $d_p$ 가 주어졌을 때 측정된 CIEXYZ 값을 나타낸다.  $R_r(d_r)$ ,  $G_g(d_g)$ ,  $B_b(d_b)$ 는 각각 red, green, blue 채널에 대한 채널 자신의 휘도 성분 값을 의미하고,  $G_r(d_r)$ 과  $B_r(d_r)$ ,  $R_g(d_g)$ 와  $B_g(d_g)$ ,  $R_b(d_b)$ 와  $G_b(d_b)$ 는 각각 red, green, blue 채널에 대한 다른 채널의 휘도 성분 값을 의미한다. 그림 2는 이렇게 구한 red, green, blue 채널에 대한 채널 자신의 성분을 나타낸 것이고 그림 3은 다른 채널의 성분을 나타낸 것이다. 만일 이상적으로 디지털 입력 값의 변화에 따른 채널 색도의 변화가 없다면 다른 채널의 휘도 성분은 나타나지 않게 된다. 하지만 실제로 디지털 입력 값의 변화에 따라 채널 색도의 변화가 생기면 그 차이가 그림 3처럼 다른 채널의 휘도 성분으로 나타나게 된다.

이러한 채널 자신 및 다른 채널의 휘도 성분에 대한 전광 변환 함수를 모델링하기 위해서 S-curve 모델(버전 II)은 채널 자신의 휘도 성분에 대해서는 식 (9), (10), (11)을 이용하고 다른 채널의 휘도 성분에 대해서

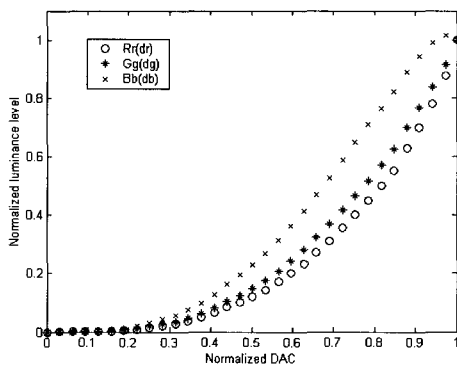
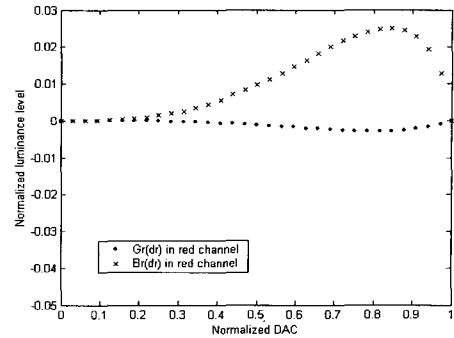
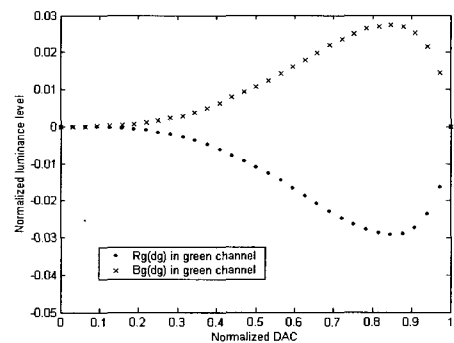


그림 2. 정규화된 디지털 입력 값과 정규화된 출력 휘도 값 사이의 전광 변환 특성 곡선

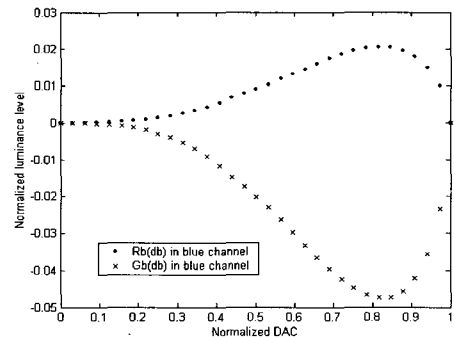
Fig. 2. Electro-optical transfer characteristics between normalized digital input values and normalized output luminance levels for red, green, and blue channels.



(a)



(b)



(c)

그림 3. 채널 색도 변화 (a) red 채널의 색도 변화를 green과 blue 채널의 정규화된 휘도 성분으로 표현 (b) green 채널의 색도 변화를 red와 blue 채널의 정규화된 휘도 성분으로 표현 (c) blue 채널의 색도 변화를 red와 green 채널의 정규화된 휘도 성분으로 표현

Fig. 3. Chromaticity-fluctuations of channel colors: (a) representation of chromaticity-fluctuation of red channel colors with normalized luminance level components of green and blue channels, (b) representation of chromaticity-fluctuation of green channel colors with normalized luminance level components of red and blue channels, and (c) representation of chromaticity-fluctuation of blue channel colors with normalized luminance level components of red and green channels.

는 식 (9), (10), (11)을 미분한 식을 이용한다. 마지막으로, 최종적인 채널의 색도 변화를 고려한 전광 변환 함수를 획득하기 위해서 S-curve 모델은 다음과 같이 채널 자신의 휘도 성분을 모델링한 전광 변환 함수 결과 값과 다른 채널에서 나온 휘도 성분을 모델링한 전광 변환 함수 결과 값들을 합한다.

$$R(d_r) = R_r(d_r) + R_g(d_g) + R_b(d_b) \quad (17)$$

$$G(d_g) = G_r(d_r) + G_g(d_g) + G_b(d_b) \quad (18)$$

$$B(d_b) = B_r(d_r) + B_g(d_g) + B_b(d_b) \quad (19)$$

## 2. Masking 모델

채널 상호 작용에 의한 색 변화를 추정하기 위하여, Masking 모델<sup>[9],[10]</sup>은 red, green, blue 색 뿐만 아니라 cyan, magenta, yellow, gray 색을 이용한다. 임의의 디지털 입력 값에 대하여 채널 상호 작용에 의한 색 변화가 고려된 CIEXYZ 값을 추정하기 위하여 red, green, blue, cyan, magenta, yellow, gray 색에 대한 CIEXYZ 추정 값을 각각 계산한 후 그것을 조합한다. red, green, blue 채널의 디지털 입력 값 중 가장 적은 값이 gray를 표현하기 위한 디지털 입력 값으로 사용되고, 이와 비슷하게 red, green, blue 채널의 디지털 입력 값 중 두 번째로 적은 값이 cyan, magenta, yellow 중 하나의 색을 표현하기 위한 디지털 입력 값으로 사용된다. 디지털 입력 값  $(d_r, d_g, d_b)$ 에 대응되는 디스플레이 출력 CIEXYZ 값을 나타내기 위한 3차원 벡터를  $\mathbf{I}(d_r, d_g, d_b)$ 라고 두면, 임의의 디지털 입력 값  $(d_r, d_g, d_b)$ 에 대한 CIEXYZ 벡터는 채널 상호 작용을 고려하기 위하여 다음과 같이 계산 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{I}(d_r, d_g, d_b) = & \mathbf{I}(d_r, d_g, d_b) + \{\mathbf{I}(d_r, d_g, 0) - \mathbf{I}(d_r, d_b, 0)\} + \{\mathbf{I}(d_r, 0, 0) - \mathbf{I}(d_g, 0, 0)\} \\ & , d_r < d_g < d_b \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)은  $\mathbf{I}(d_r, d_g, d_b)$ 을 사용함으로써 red, green, blue 채널 사이의 채널 상호작용이 고려되었고,  $\mathbf{I}(d_r, d_r, 0)$ 을 사용함으로써 red, green 채널 사이의 채널 상호작용이 고려되었기 때문에 단지  $\mathbf{I}(d_r, 0, 0)$ ,  $\mathbf{I}(0, d_g, 0)$ ,  $\mathbf{I}(0, 0, d_b)$ 을 합한 결과보다 더욱 정확한 결과가 도출된다.

또한 채널 색도의 변화에 의해 야기되는 오차를 최소화하기 위해 Masking 모델은 각 채널에서 측정된

CIEXYZ 벡터에 대하여 주성분 분석을 방법을 이용하여 하나의 주성분을 추출한 후 그것을 사용한다. 주성분 분석 방법을 사용함으로써, 측정된 CIEXYZ 벡터는 다음과 같이 하나의 벡터로 표현될 수 있다.

$$\mathbf{I}_i(d_i) = C_i(d_i) \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} \quad (21)$$

여기서  $i$ 는  $r, g, b, c, m, y, k$ 를 나타낸다.  $[X_{i,PCA}, Y_{i,PCA}, Z_{i,PCA}]^T$ 는 측정된 데이터의 첫 번째 주성분을 의미하며 단위 길이가 되도록 정규화 되었다. 이것을 이용하면 디지털 입력 값  $d_i$ 에 대한  $C_i(d_i)$ 는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C_i(d_i) = \mathbf{I}_i(d_i)^T \begin{bmatrix} X_{i,PCA} \\ Y_{i,PCA} \\ Z_{i,PCA} \end{bmatrix} \quad (22)$$

그리고 임의의 디지털 입력 값에 대한  $C_i(d_i)$ 는 식(22)에 의해 계산된  $C_i(d_i)$ 를 보간함으로써 계산된다.

## V. 모바일 LCD를 위한 제안한 특성화 방법

S-curve 모델은 각 채널에 대한 휘도 값을 채널 자신의 휘도 성분과 다른 채널의 휘도 성분으로 나누고 각 채널에서 채널 자신의 휘도 성분에 대한 전광 변환 함수와 다른 채널의 휘도 성분에 대한 전광 변환 함수를 각각 모델링 한다. 이때, 다른 채널의 휘도 성분의 모델링은 채널 자신의 휘도 성분에 대한 전광 변환 함수의 미분 식을 이용하여 수행된다. 하지만, 그림 4에서 보는 바와 같이 채널 자신의 전광 변환 함수를 미분한 곡선은 다른 채널의 휘도 성분을 모델링 하는데 잘 맞지 않는다. 더구나, S-curve 모델은 디스플레이의 채널 독립성을 가정하여 LCD에서 채널 상호 작용<sup>[11],[12]</sup>에 의한 채널간 가산 법칙의 위배는 고려하지 않았다. 반면, 가산 법칙의 위배를 고려하기 위하여 Masking 모델은 red, green, blue 색 뿐만 아니라 cyan, magenta, yellow, gray 색을 이용하였다. 그리고 채널 색도의 변화를 고려하기 위하여 채널당 측정된 CIEXYZ 벡터로부터 추출한 단일 주성분 벡터를 이용하여 CIEXYZ 값을 계산한다. 하지만, CIEXYZ 벡터들 사이에 적당한 선형 관계가 성립되어 있지 않다면 3차원의 CIEXYZ 벡터를 하나의 벡터로 근사화 시키는 것

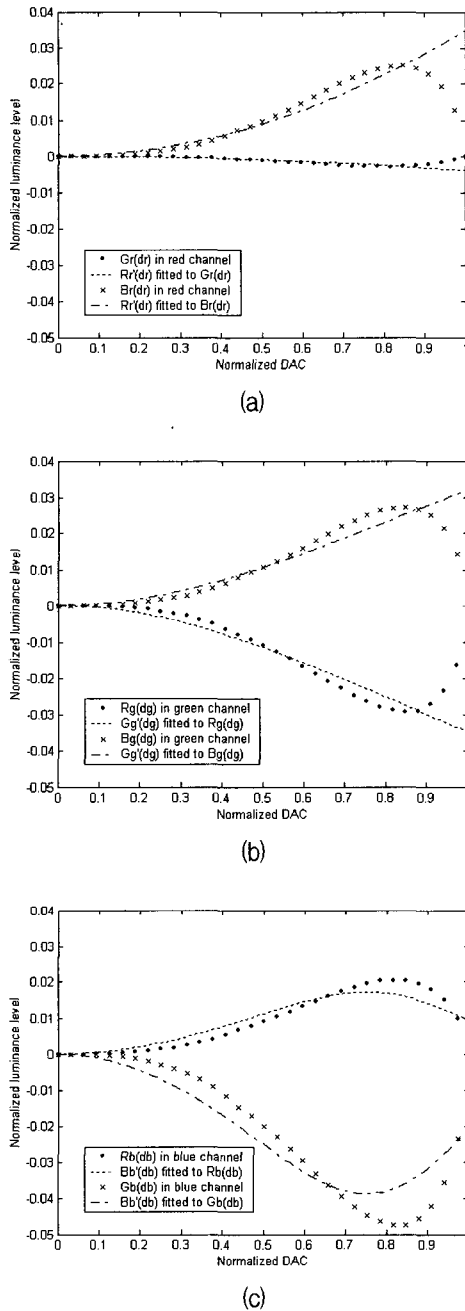


그림 4. 한 채널에서 채널 자신 성분의 전광 변환 함수의 미분치로 다른 채널 성분의 휘도 레벨 값 모델링 (a) red 채널 (b) green 채널 (c) blue 채널

Fig. 4. Modeling luminance level components of other channels using derivative of EOTF of self-channel for each channel; (a) red channel, (b) green channel, and (c) blue channel.

은 특성화 오차를 크게 만들 우려가 있다. 또한, 좀더 정확한 CIEXYZ 벡터를 계산하기 위해서 세 개의 주성분 벡터가 모두 이용된다면 비교적 복잡한 주성분 분석 알고리즘을 이용하는 이유가 사라지게 된다. 오히려 CIEXYZ 벡터 자체를 직접 이용하는 것이 더욱 효과적

이다. 따라서 본 논문은 채널과 채널간 성분에 대해서 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 각각 직접 모델링하는 방법을 제안한다.

제안하는 특성화 방법은 그림 1과 같이 서로 다른 형태의 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 red, green, blue 채널에 대해서 S-curve 모델의 수학적 모델을 차용하여 다음과 같이 모델링한다.

$$R_r(d_r) = A_r \frac{[d_r / (2^N - 1)]^{\alpha_r}}{[d_r / (2^N - 1)]^{\beta_r} + E_r} \quad (23)$$

$$G_r(d_g) = A_g \frac{[d_g / (2^N - 1)]^{\alpha_g}}{[d_g / (2^N - 1)]^{\beta_g} + E_g} \quad (24)$$

$$B_r(d_b) = A_b \frac{[d_b / (2^N - 1)]^{\alpha_b}}{[d_b / (2^N - 1)]^{\beta_b} + E_b} \quad (25)$$

여기서  $R_r(d_r)$ ,  $G_r(d_g)$ ,  $B_r(d_b)$ 는 각각 red, green, blue 채널에 대하여 임의의 디지털 입력 값  $d_r$ ,  $d_g$ ,  $d_b$ 에 대응되는 정규화된 I 값,  $I = X, Y, Z$ , 이다.  $A_{p_i}$ ,  $\alpha_{p_i}$ ,  $\beta_{p_i}$ ,  $E_{p_i}$ ,  $p = r, g, b$ ,  $I = X, Y, Z$ , 는 계산되어야 하는 모델 파라미터이다. 최적의 파라미터  $A_{p_i}$ ,  $\alpha_{p_i}$ ,  $\beta_{p_i}$ ,  $E_{p_i}$ 를 추정하기 위해서 각 채널에서 등간격의 디지털 입력 값에 대한 32개의 패치를 만들어 CIEXYZ 값을 측정하고 정규화한다. 그 후에 최적화 과정을 통하여 최적의 파라미터  $A_{p_i}$ ,  $\alpha_{p_i}$ ,  $\beta_{p_i}$ ,  $E_{p_i}$ 를 계산한다. 이때 패치에 대한 정규화된 CIEXYZ 값과 그에 따른 디지털 입력 값이 이용된다. 본 최적화 과정에서는 Matlab의 fminsearch 함수를 이용하여 32개 패치의 정규화된 CIEXYZ 값과 주어진 식의 결과 값의 오차가 최소가 되도록 하는 파라미터를 찾았다.

또한, 채널 상호 작용에 기인한 채널간 가산 법칙의 위배를 고려하기 위하여 채널간 성분인 cyan, magenta, yellow, gray (CMYK)에 대해서 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 다음과 같이 모델링한다.

$$C_r(d_c) = A_c \frac{[d_c / (2^N - 1)]^{\alpha_c}}{[d_c / (2^N - 1)]^{\beta_c} + E_c} \quad (26)$$

$$M_r(d_m) = A_m \frac{[d_m / (2^N - 1)]^{\alpha_m}}{[d_m / (2^N - 1)]^{\beta_m} + E_m} \quad (27)$$

$$Y_r(d_y) = A_y \frac{[d_y / (2^N - 1)]^{\alpha_y}}{[d_y / (2^N - 1)]^{\beta_y} + E_y} \quad (28)$$

$$K_i(d_k) = A_k \frac{[d_k / (2^N - 1)]^{\beta_i}}{[d_k / (2^N - 1)]^{\beta_i} + E_k} \quad (29)$$

여기서  $d_c, d_m, d_y, d_k$ 는  $(0, d_c, d_c), (d_m, 0, d_m), (d_y, d_y, 0), (d_k, d_k, d_k)$ 을 의미하며, 둘 혹은 세 채널의 디지털 입력 값을 나타낸다.  $C_i, M_i, Y_i, K_i$ 는 각각 채널간 성분인 cyan, magenta, yellow, gray에 대한 정규화된  $I$  값,  $I=X, Y, Z$ , 이다.

일단 전광 변환 함수가 모델링 되면, 최적의 파라미터로 구성된 채널과 채널간 성분별 모델링 함수를 이용해서 임의의 디지털 입력 값에 대한 채널과 채널간 성분의 정규화된 CIEXYZ 값을 추정할 수 있다. 최종적으로, 채널 상호 작용이 고려된 CIEXYZ 값을 계산하기 위하여 추정된  $R_i(d_r), G_i(d_g), B_i(d_b), C_i(d_c), M_i(d_m), Y_i(d_y), K_i(d_k)$ 는 다음과 같이 이용된다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \text{diag} \begin{bmatrix} X_{p,\max} & X_{s,\max} & X_{k,\max} \\ Y_{p,\max} & Y_{s,\max} & Y_{k,\max} \\ Z_{p,\max} & Z_{s,\max} & Z_{k,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_r(d_1) - P_r(d_2) & P_r(d_1) - P_r(d_2) & P_r(d_1) - P_r(d_2) \\ S_x(d_2) - S_x(d_3) & S_y(d_2) - S_y(d_3) & S_z(d_2) - S_z(d_3) \\ K_x(d_3) & K_y(d_3) & K_z(d_3) \end{bmatrix}$$

$$\text{for } P = \begin{cases} R, d_1 = d_r \\ G, d_1 = d_g \\ B, d_1 = d_b \end{cases}, S = \begin{cases} C, d_3 = d_c \\ M, d_3 = d_m \\ Y, d_3 = d_y \end{cases} \quad (30)$$

여기서  $d_1$ 은  $d_r, d_g, d_b$  중에서 가장 큰 디지털 입력 값을 나타내고,  $d_2$ 는 두 번째로 큰 디지털 입력 값을 나타내며,  $d_3$ 은 가장 작은 디지털 입력 값을 나타낸다.  $I_{p,\max}, I_{s,\max}, I_{k,\max}, I=X, Y, Z$ , 는 각각 채널, 채널간 성분, gray에 대한 최대 CIEXYZ 값을 의미한다.  $K_i$ 를 사용함으로써 red, green, blue 채널 사이의 채널 상호 작용이 고려되었고,  $C_i, M_i, Y_i$ 를 사용함으로써 green, blue 채널, red, blue 채널, red, green 채널 사이의 채널 상호 작용이 고려되었다.

VI. 실험 및 결과

본 실험에 사용된 모바일 LCD는 SAMSUNG 휴대폰 SCH-S200의 LCD이다. 디스플레이에 출력된 패치의 CIEXYZ 값을 측정하기 위해서 Minolta CS-1000 분광 방사휘도계를 사용하였다. 각 채널 및 채널간 성분 red, green, blue, cyan, magenta, yellow, gray의 전광 변환 함수를 추정하기 위해서 224(32×7)개의 패치를 사용하였다. 또한 임의의 색 자극 값을 예측하는 특성화 성능을 평가하기 위해서 RGB 육면체 색 공간에서 균일하게

표 2. 전광 변환 함수의 최적 파라미터

Table 2: Optimal parameters for electro-optical transfer functions.

Components	XYZ	A	α	β	E
Red	X	6.840	3.015	0.577	6.302
	Y	8.847	3.001	0.649	8.421
	Z	2.956	2.743	7.741	1.965
Green	X	6.659	2.959	1.601	5.902
	Y	4.465	3.008	1.794	3.551
	Z	4.589	2.748	6.786	3.517
Blue	X	3.143	2.883	4.939	2.056
	Y	10.58	2.732	7.726	9.613
	Z	4.618	2.550	10.42	3.553
Cyan	X	3.555	2.976	3.725	2.538
	Y	5.716	2.837	4.929	4.737
	Z	4.533	2.545	10.97	3.491
Magenta	X	5.432	2.914	2.412	4.559
	Y	5.445	2.964	2.505	4.565
	Z	3.133	2.505	8.343	2.129
Yellow	X	46.10	2.820	2.618	45.99
	Y	36.05	2.796	5.048	35.63
	Z	4.744	2.568	10.01	3.687
Gray	X	3.664	3.017	3.144	2.684
	Y	7.366	2.798	5.875	6.407
	Z	3.033	2.542	10.92	2.087

표 3. 혼합 색과 순수 색 및 채널 사이 색들의 합 사이의 색차

Table 3. Color differences between mixed colors and mixture of pure colors and inter-channel colors.

200 (6×6×6-16)개 패치	$I_{rgb}(d_r, d_g, d_b)$ 와 $I_p(d_1) - I_p(d_2) + I_s(d_2) - I_s(d_3) + I_k(d_3)$ 의 비교			
	$ \Delta X $	$ \Delta Y $	$ \Delta Z $	$\Delta E_{ab}$
평균값	0.98	1.16	1.36	1.84
최대값	3.62	4.83	8.11	5.33

분포하는 216(6×6×6)개의 패치를 사용하였다. 본 실험을 통하여 도출한 각 채널 및 채널간 성분에 대한 전광 변환 함수의 최적 파라미터는 표 2에 제시하였다.

표 3은 red, green, blue 세 채널 중 두 채널 이상이 사용된 200개의 패치를 대상으로 패치 자체를 측정하는 색 자극 값과 각 채널 및 채널간 성분별 패치를 측정하는 색 자극 값을 이용하여 계산한 결과 사이의 X, Y, Z 및 CIELAB 색차에 대해 평균값과 최대값을 보여주고 있다. 모든 색은 RGB 육면체 색 공간에서 균일하게 분포하는 216(6×6×6)개 패치 중에서 선택되었다. 표 3에서



표 4. 기존의 특성화 방법과 제안한 방법을 이용한 모바일 LCD의 특성화 오차

Table 4. Characterization errors in mobile LCD when using conventional characterization method and proposed method.

방법	패치	32개의 red	32개의 green	32개의 blue	임의의 216개
S-curve 모델 I	$\Delta E_{avg}$	5.059	4.246	8.469	5.986
	$\Delta E_{max}$	9.362	7.183	14.58	14.73
S-curve 모델 II	$\Delta E_{avg}$	1.284	1.176	3.331	4.225
	$\Delta E_{max}$	10.39	5.984	8.612	10.47
9개 전광 변환 함수 모델링	$\Delta E_{avg}$	0.639	0.607	0.851	3.233
	$\Delta E_{max}$	3.806	2.334	3.018	8.090
Masking 모델	$\Delta E_{avg}$	3.294	2.523	4.670	6.583
	$\Delta E_{max}$	6.145	4.387	8.725	12.31
제안한 방법	$\Delta E_{avg}$	0.639	0.607	0.851	2.241
	$\Delta E_{max}$	3.806	2.334	3.018	5.483

사용된 모든 측정된 색 자극 값은 최초 측정값에서 블랙 패치의 색 자극 값을 뺀 결과 값이다. 표 1과 비교해 볼 때, 표 2에서는 평균  $\Delta E_{ab}$  색차가 3 아래로 줄어들었고 최대  $\Delta E_{ab}$  색차가 5.33으로 줄어든 것을 볼 수 있다. 이것은 채널 자체의 색 뿐만 아니라 채널간 성분의 색을 사용하는 것이 채널 상호 작용으로 발생하는 좋지 않은 채널 독립 특성을 보상하는데 효과적이라는 것을 증명한다.

표 4는 기존의 특성화 방법과 제안한 특성화 방법을 이용하여 모바일 LCD를 특성화 한 후 그 오차를 보여 주고 있다. 각 채널당 32개의 패치와 모든 RGB 육면체 색 공간에서 균일하게 분포하는 216(6×6×6)개 패치에 대하여 색 자극의 측정값과 추정값 사이의 오차를 평균 및 최대 CIELAB 색차로 나타내었다. 전반적으로 제안한 방법의 특성화 오차가 다른 기존 방법의 특성화 오차보다 더 적은 것을 볼 수 있다.

## VII. 결 론

기존의 GOG 모델과 S-curve 모델은 모두 디스플레이 특성화 과정을 단순화시키기 위해서 채널 색도 일관성과 채널 독립성을 가정하였다. GOG 모델은 CRT 디

스플레이에 대해서는 매우 우수한 성능을 보이며, 따라서 ICC 위원회에서도 이를 디스플레이 특성화의 표준화 방법으로 채택하였다. 하지만 채널 색도 일관성과 채널 독립성의 가정은 모바일 디스플레이에 대해서는 잘 성립되지 않는다. 즉, 모바일 디스플레이에서는 X, Y, Z 색 자극 값의 전광 변환 함수가 서로 같지 않고, 채널 사이의 가산 법칙이 각 채널의 색 자극 값의 선형 합을 기반으로 여러 채널이 혼합된 색의 자극 값을 계산할 만큼 충분히 성립되지 않는다. 따라서 본 논문에서는 모바일 LCD 특성화를 위해서 21개의 전광 변환 함수를 모델링 하였다. 채널 색도 변화 특성을 고려하기 위해 red, green, blue 채널에 대해서 하나의 전광 변환 함수 대신에 각 X, Y, Z 값의 전광 변환 함수를 전부를 모델링 하였다. 또한 부족한 채널 독립 특성을 보상하기 위해 세 개의 red, green, blue 채널뿐만 아니라 채널간 성분인 cyan, magenta, yellow, gray에 대해서도 CIEXYZ 값의 전광 변환 함수를 전부 모델링 하였다. 모바일 디스플레이에 대한 특성화 실험을 통해서 는 제안한 방법의 유효성을 검증하였다.

## 참 고 문 헌

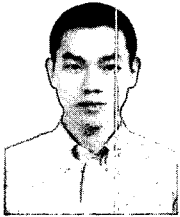
- [1] R. S. Berns, R. J. Motta, and M. E. Gorzynski, "CRT Colorimetry. Part I: Theory and Practice," *Color Research and Application*, vol. 18, no. 5, pp. 299-314, Oct. 1993.
- [2] R. S. Berns, M. E. Gorzynski, and R. J. Motta, "CRT Colorimetry. Part II: Metrology," *Color Research and Application*, vol. 18, no. 5, pp. 315-325, Oct. 1993.
- [3] R. S. Berns, "Methods for characterizing CRT displays," *Displays*, vol. 16, no. 4, pp. 173-182, May 1996.
- [4] Y. S. Kwak and L. W. MacDonald, "Characterisation of a desktop LCD projector," *Displays*, vol. 21, no. 5, pp. 179-194, Dec. 2000.
- [5] Y. S. Kwak and L. W. MacDonald, "Accurate prediction of color liquid crystal displays," *Ninth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering*, Scottsdale, U.S.A., pp. 355-359, Nov. 2001.
- [6] 박기현, 이명영, 이철희, 하영호, "개선된 S-curve 모델과 RGB 칼라 LUT를 이용한 모니터와 모바일 디스플레이 장치간 색 정합," *전자공학회논문지*, 제 41권 SP편, 제6호, 33-41쪽, 2004년 11월
- [7] G. Sharma, "LCDs versus CRTs - Color-calibration and gamut considerations," *Proceedings*

- of the *IEEE*, vol. 90, no. 4, pp. 605-622, Apr. 2002.
- [8] G. Sharma, *Digital color imaging handbook*, CRC Press, 2003.
- [9] N. Tamura, N. Tsumura, and Y. Miyake, "Masking model for accurate colorimetric characterization of LCD," *Tenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering*, Scottsdale, U.S.A., pp. 312-316, Nov. 2002.
- [10] N. Tamura, N. Tsumura, and Y. Miyake, "Masking model for accurate colorimetric characterization of LCD," *Journal of the Society for Information Display*, vol. 11, no. 2, pp. 333-339, Jun. 2003.
- [11] Y. Yoshida and Y. Yamamoto, "Color calibration of LCDs," *Tenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering*, Scottsdale, U.S.A., pp. 305-311, Nov. 2002.
- [12] X. Feng and S. J. Daly, "Improving color characteristics of LCD," *IS&T/SPIE 17th Annual Symposium Electronic Imaging: Science and Technology*, vol. 5667, pp. 328-335, Jan. 2005.

---

 저 자 소 개
 

---



박 기 현(학생회원)  
 2002년 2월 경북대학교  
 전자전기공학부 졸업.  
 2004년 2월 경북대학교  
 전자공학과 석사 졸업.  
 2004년 3월~현재 경북대학교  
 전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 칼라 영상 처리, 디스플레이 색 향  
 상, 카메라 화질 평가>

손 창 환(학생회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제43권 SP편 제3호 참조

권 오 설(학생회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제 40권 SP편 제2호 참조

하 영 호(정회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제 38권 SP편 제3호 참조