

논문 2005-42SP-5-11

# 디스플레이 장치를 위한 9개 채널 계조 응답 곡선에 기반한 역 특성화 기법

(Inverse Characterization Method Based on 9 Channel Tone Response Curves for Display Device)

임 혜 봉\*, 조 양 호\*\*, 박 기 현\*\*, 하 영 호\*

(Hye-Bong Im, Yang-Ho Cho, Kee-Hyon Park, and Yeong-Ho Ha)

## 요 약

디지털 입력값과 이에 대응되는 CIEXYZ 삼 자극치 값에 대한 관계를 도출하는 기법인 디스플레이 특성화는 칼라 운영 시스템에서 정확한 색을 재현하는데 중요하다. 9개 채널 계조 응답 곡선으로부터 추정된 디스플레이 장치의 특성화는 기존 3개 채널의 계조 응답 곡선을 사용한 것 보다 성능이 향상된다. 하지만 9개 채널의 계조 응답 곡선을 사용한 디스플레이 장치의 특성화는 각각의 RGB값에 대응되는 CIEXYZ값이 분리되지 않기 때문에, 역 특성화 과정이 직접적으로 적용되지 않는다. 따라서 일반적인 경우 역 특성화 과정은 3차원 참조표를 사용하여 구현된다. 3차원 참조표를 역 특성화 과정에 적용할 경우, 결과의 정확도는 향상 되지만 많은 양의 메모리 공간과 다수의 측정 데이터가 필요한 단점이 있다. 그러므로 본 논문에서는 채널 의존적인 값의 모델링과 GOG(gain, offset, gamma) 모델에 기반한 9개 채널의 역 변환 과정을 적용한 역 특성화 기법을 제안한다. 제안한 방법은 디스플레이 특성화의 정확도를 향상할 뿐 아니라 3차원 참조표 방법을 사용할 경우 요구되는 복잡도와 다수의 측정 데이터도 감소할 수 있다.

## Abstract

Display characterization, deriving the relationship between digital input values and the corresponding CIEXYZ tri-stimulus values, is important to reproduce the accurate color in color management system. The relationship can be estimated from the nine channel TRCs(tone response curves) and the result of this characterization method is better than that of using three channel TRCs. However, the inverse display characterization using nine channel TRCs cannot be directly inverted, because the CIEXYZ values corresponding to each of RGB values are inseparable. Accordingly, inverse display characterization is usually implemented by the 3D-LUT (look-up table) method. Although the result of 3D-LUT is accurate, creating the 3D-LUT requires a lot of memory space and considerable amount of measurements. Therefore the inverse characterization method is proposed based on the modeling of channel-dependent values and nine channel inverse process based on the GOG(gain, offset, gamma) model. The proposed method enhances the accuracy of display characterization and reduces the complexity and the number of measurements data required for accuracy in 3-D LUT.

**Keywords :** 디스플레이 특성화, 채널 응답 곡선, GOG 모델, 3차원 참조표

## I. 서 론

디스플레이 장치의 기술 개발과 발전으로 인해 기존 CRT형 기반의 디스플레이 장치이외에도 LCD, PDP,

LCD Projection TV, DLP 등 다양한 디스플레이 장치가 대중화 되어 있다. 이러한 장치들은 각각 다른 전자 소자와 구동 방법으로 색을 표현하고, 이에 따라 장치 특성이 달라진다. 즉, 각 장치에 동일한 입력신호가 인가될 경우, 출력되는 영상이 동일하게 재현되어야 하지만 각 디스플레이 장치에 따른 기준백색, 색의 재현 범위, 계조의 응답 곡선 등에 의해 재현되는 영상이 다르게 나타난다. 따라서 동일한 컬러 입력 영상신호에 대

\* 정회원, \*\* 학생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 (School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)  
접수일자: 2005년2월17일, 수정완료일: 2005년4월29일

하여 장치 독립적인 칼라 재현을 가능하게 하기 위해서는 입력신호에 따른 디스플레이 장치의 출력된 색자극치 값과의 변환 관계를 정의하여, 정의된 기준 색을 이용하여 서로 다른 디스플레이 장치의 출력 특성을 보정하는 연구가 필요하다. 이를 위해 디스플레이 장치의 구동 신호인 RGB 입력 신호와 표준 색 자극치값인 CIEXYZ값과의 입출력 관계를 모델링하는 디스플레이 장치 특성화 기법이 필요하다.<sup>[1]-[3]</sup> 디스플레이 색 표준 신호인 sRGB(standard RGB) 입력신호가 장치특성이 다른 디스플레이 장치들에 인가될 경우, sRGB의 입력 신호에 따른 출력 색이 모두 동일해야 하지만, 각 디스플레이 장치의 서로 다른 특성으로 인해 출력 색 자극치는 다르게 나타난다. 즉 동일한 RGB 신호를 인가하더라도, 재현되는 색 자극은 다르게 나타나기 때문에 최종 인지는 영상도 다르게 느껴진다. 그러므로 출력영상을 각각의 서로 다른 디스플레이 장치를 통해 재현하더라도 동일한 영상으로 나타내기 위해서는, 표준 색 자극치인 CIEXYZ값에 기반한 색 처리 과정을 디스플레이 장치에 적용하여야 한다. 각 장치마다 인지되는 색을 동일하게 하기 위해서는 측정된 CIEXYZ값을 일치하기 위한 서로 다른 RGB값을 인가하는 컬러 정합 기법을 적용하여야 한다.

본 논문은 디스플레이 장치간의 컬러 정합 기술에 필요한 입출력관계를 모델링 하여, 디스플레이 장치의 효과적인 특성화 및 역 특성화 기법을 제안한다. 디스플레이 장치의 입출력관계를 모델링하기 위해서, 기존의 3차원 참조표를 적용한 방법 및 다항 회귀방정식을 사용한 변화 계수 추정방법이 있다. 하지만 이러한 방법은 모델링의 정확도에 비해 많은 양의 측정 데이터가 요구되고, 연산이 복잡해지는 단점이 있다. 이에 반해 소수의 측정 데이터를 사용하는 GOG 모델,<sup>[1]-[3]</sup> S-curve 모델<sup>[4],[5]</sup> 등은 적은 양의 측정데이터로 모델링이 가능하기 때문에 연산이 간단하며, 모델링의 정확도도 다수의 측정 데이터에 기반한 기법에 비해 크게 차이 나지 않기 때문에 디스플레이 장치 특성화에 효과적으로 사용되고 있다. 그러나 RGB 채널에 따른 각각의 삼자극치 CIEXYZ값이 동일한 전기-빛 입출력 곡선을 가지지 않는 디스플레이 장치의 경우는, 기존 모델링에서와 같이 휘도 값(luminance, Y)의 자극치만으로 특성화를 수행할 경우 특성화 오차가 크게 나타난다. 이를 보완하기 위해 최근에는 RGB 채널에 따른 삼자극치 CIEXYZ값을 9채널로 각각 다른 전기-빛 입출력 곡선으로 모델링 하는 채널-독립 특성화를 수행하여, 특성

화 오차를 감소한다.<sup>[6],[7]</sup>

장치 특성화 기법을 실제 디스플레이 장치에 적용하기 위해서는, 표준 색 자극치 CIEXYZ값에 대응되는 입력 RGB값을 추출하는 역방향 특성화 과정이 수행되어야 한다.<sup>[6]</sup> 기존의 휘도 값인 Y의 자극치만으로 특성화를 수행하는 GOG 모델의 경우에는, 특성화 수식의 역 과정으로 직접적인 역 특성화가 구현된다. 하지만 GOG 모델을 기반으로 한 9개 채널의 채널-독립 특성화를 수행할 경우에는, 역 과정이 수식적으로 곧바로 수행되지 못하는 단점을 가지고 있다.<sup>[6]</sup> 따라서 CIEXYZ값에 대응되는 RGB값을 획득하는 역방향 특성화 과정은 일반적으로 3차원 참조표 방법을 사용하여 구현된다.<sup>[6],[8]</sup> 그러나 3차원 참조표 방법을 사용할 경우에는 전술한 바와 같이, 많은 양의 측정데이터와 메모리가 필요 하며, GOG 모델의 역 특성화 방법에 비해 수행과정의 복잡성도 증가한다.

그래서 본 논문에서는 다양한 디스플레이의 입출력 관계를 모델링 하기 위해 필요한 디스플레이 특성화 과정을 GOG 모델 기반의 9개 채널-독립 특성화 과정을 수행하여 모델링의 정확도를 향상하였다. 또한 직접적인 방법으로 역 과정이 성립하지 않는 9개 채널-독립 특성화의 단점을 3차원 참조표 방법이 아닌, GOG 모델을 기반으로 한 채널-독립 역 특성화 과정을 통해 CIEXYZ값에 대응하는 디스플레이 장치의 RGB 과정을 획득하는 과정을 수행하였다. 실제 LCD 장치의 특성화 실험을 통해 GOG 모델을 기반으로 한 채널-독립 특성화 과정이 기존 3채널 GOG 모델이나 다항 회귀방정식 모델의 특성화 오차에 비해 감소함을 알 수 있었으며, GOG 모델을 기반으로 한 채널-독립 역방향 특성화를 수행할 경우에도 역방향 특성화 오차가 다른 방법들에 비해 상대적으로 작은 값을 알 수 있었다. 제안한 방법은 기존 역방향 변환을 위해 적용하고 있는 3차원 참조표 방법에 비해, 많은 양의 측정 데이터도 필요 하지 않으며 메모리의 낭비도 줄일 수 있다. 뿐만 아니라 역방향 특성화의 경우 GOG 모델을 기반으로 한 채널-독립 특성화 과정의 파라미터를 그대로 사용함으로써 역 특성화 과정의 수행의 복잡성도 크게 증가하지 않는다.

## II. GOG모델 기반 채널-독립 특성화

기존 3채널 GOG 모델은 디스플레이 장치특성을 입력 디지털 값과 출력으로 측정된 CIEXYZ값 중에서 영상의 휘도값만을 각 RGB 채널별로 모델링 한다. 그러

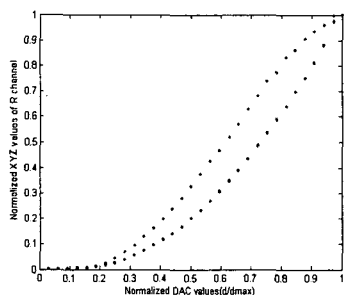


그림 1. 디지털 입력 R채널의 정규화된 CIEXYZ 값의 측정치

Fig. 1. The normalized CIEXYZ values of the red channel input.

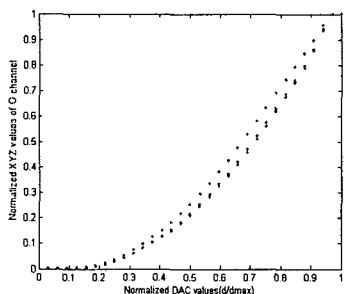


그림 2. 디지털 입력 G채널의 정규화된 CIEXYZ 값의 측정치

Fig. 2. The normalized CIEXYZ values of the green channel input.

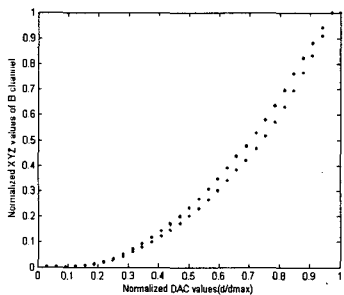


그림 3. 디지털 입력 B채널의 정규화된 CIEXYZ 값의 측정치

Fig. 3. The normalized CIEXYZ values of the blue channel input.

나 실제의 디스플레이 장치의 경우는 각 입력 RGB 채널에 해당하는 출력 CIEXYZ값의 전기-빛 입출력 곡선은 9개 채널 모두가 동일하지 않다.<sup>[6]</sup>

즉 채널별 입력 디지털 값과 휘도값만으로 모델링하여 CIEXYZ 값을 추정할 경우 Y채널의 값은 모델링이 잘 이루어짐으로 추정이 정확히 이루어지나, X와 Z채널은 Y채널과 다른 전기-빛 입출력 곡선을 가지고 있음에도 불구하고 Y채널과 동일한 전기-빛 입출력 곡선을 이용하여 추정함으로써 정확한 추정이 이루어지지 못하

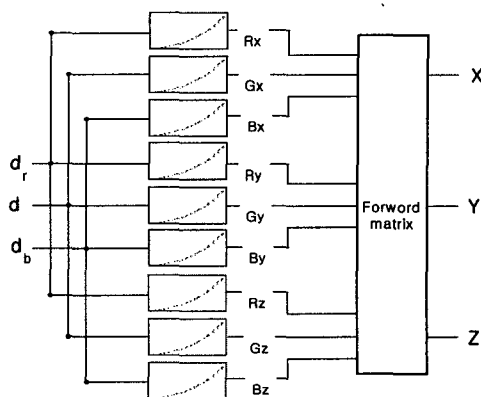


그림 4. 채널-독립 특성화 방법

Fig. 4. Channel-independent characterization method.

는 단점이 있다. 따라서 이런 특성화 오차를 줄이기 위해 선 각 입력 디지털 RGB 채널에 따른 CIEXYZ 값의 각 X, Y, Z 값의 전기-빛 입출력 곡선을 따로 계산하여 특성화 오차를 줄일 수 있다.<sup>[6]</sup> 본 논문에서는 그림 1에서 3과 같이 전기-빛 입출력 곡선을 X, Y, Z 값에 대해 각각 모델링 하여 특성화를 수행함으로써, 단일 Y 값의 전기-빛 입출력 곡선만을 모델링 한 방법에 비해 특성화의 정확도를 높이고자 한다.

GOG 모델기반의 채널-독립 특성화는 RGB 입력 신호에 따라 측정된 CIEXYZ 값을 9채널의 전기-빛 입출력 곡선에 각각 GOG모델을 각각 적용한다.<sup>[1]-[3],[6]</sup>

$$\begin{aligned}
 R_i &= \{k_{g,ri} [d_r / (2^N - 1)] + k_{o,ri}\}^{\gamma_{ri}} \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g,ri} [d_r / (2^N - 1)] + k_{o,ri}\} \leq 0 \\
 G_i &= \{k_{g,gi} [d_g / (2^N - 1)] + k_{o,gi}\}^{\gamma_{gi}} \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g,gi} [d_g / (2^N - 1)] + k_{o,gi}\} \leq 0 \\
 B_i &= \{k_{g,bi} [d_b / (2^N - 1)] + k_{o,bi}\}^{\gamma_{bi}} \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g,bi} [d_b / (2^N - 1)] + k_{o,bi}\} \leq 0
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $d_r, d_g, d_b$ 는 입력 디지털 값이고,  $N$ 은 디스플레이 장치의 입력 디지털 값의 비트 수이다. 즉  $2^N - 1$ 을 하면 입력 디지털 값의 최대 값이 되고, 입력 디지털 값을 0에서 1까지 정규화 하기 위하여 나누는 데 사용된다.  $R, G, B$ 는 각각 Red, Green, Blue 채널에서의 입력 디지털 값에 따른 휘도 값을 0에서 1까지로 정규화 했을 때의 값이고, RGB채널의 입력에 따른 CIEXYZ 채널은  $c_i$  ( $c = r, g, b$  and  $i = X, Y, \text{ and } Z$ )

이다. 최적의 변수  $kg$ (gain),  $ko$ (offset),  $\gamma$ (gamma)값을 구하기 위해 RGB 채널별로 등 간격의 디지털 값으로 패치를 만들고, 각각의 CIEXYZ 값을 측정하여 입력 디지털 값과 그에 각각의 X, Y, Z 값의 측정치를 식 (1)에 대입한다. 최적화 알고리즘을 사용하여  $kg$ ,  $ko$ ,  $\gamma$  값을 계산함으로써 전기-빛 입출력 곡선을 모델링한다. 채널별로 추정된 정규화된 휘도 값을 다음과 같은 행렬 연산을 이용해 CIEXYZ 값으로 변환한다.<sup>[1]-[3],[4]-[6]</sup>

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \text{diag} \left( \begin{bmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_X & R_Y & R_Z \\ G_X & G_Y & G_Z \\ B_X & B_Y & B_Z \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

여기서  $X_{max}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{max}$ 는 각 채널별로 가장 큰 디지털 값을 입력으로 주었을 때 출력되는 빛의 CIEXYZ 값이고,  $R_X, R_Y, R_Z$  와  $G_X, G_Y, G_Z$  및  $B_X, B_Y, B_Z$  값은 식 (1)에서 모델링 한 정규화 된 X, Y, Z 값의 추정치이다.

### III. 제안한 GOG 모델 기반 채널-독립 역특성화

본 논문에서 제안한 역 특성화 방법은 GOG모델을 기반으로 한 채널-독립 역 특성화 방법이다. 채널-독립 특성화를 수행할 경우, 각 RGB채널의 CIEXYZ값은 9 채널의 전기-빛 입출력 곡선으로 특성화하여 추정할 수 있으며 그 결과는 기존의 3채널 전기-빛 입출력 곡선으로 특성화 하여 추정한 결과에 비해 매우 뛰어나다. 그러나 역으로 CIEXYZ값으로 RGB채널 값을 추정하는 역 특성화의 경우에는 각각의 RGB채널 값에 해당하는 CIEXYZ값을 직접적으로 분리할 수가 없기 때문에 9채널의 전기-빛 입출력 곡선을 이용한 직접적인 역 특성

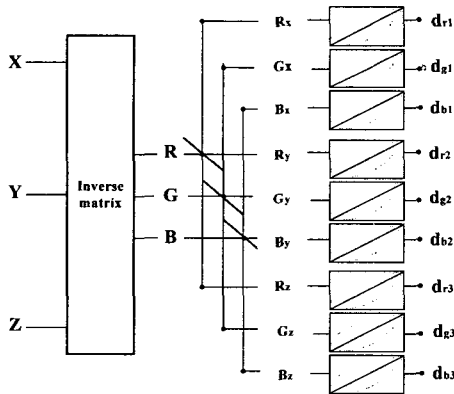


그림 5. 직접적인 채널-독립 역 특성화의 한계성  
Fig. 5. Limitation of the channel-independent inverse characterization.

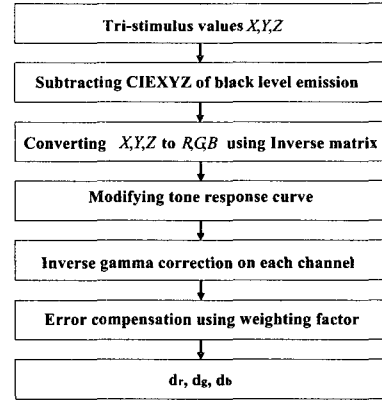


그림 6. 제안한 채널-독립 역 특성화 방법의 흐름도  
Fig. 6. Flowchart of the proposed channel-independent inverse characterization method.

화 방법이 불가능하다.<sup>[6]</sup>

그림 5와 같이 정 방향 특성화에 사용된 식 (2)의 행렬의 역행렬을 이용하여 휘도 값이 고려된  $R, G, B$  값을 얻을 경우 각각의 전기-빛 입출력 곡선에 맞는 입력 값이 인가되어야 한다.

하지만  $R_X, R_Y, R_Z$ 의 각각의 전기-빛 입출력 곡선에 동일한  $R$  값과,  $G_X, G_Y, G_Z$ 의 각각의 전기-빛 입출력 곡선에 동일한  $G$  값,  $B_X, B_Y, B_Z$ 의 각각의 전기-빛 입출력 곡선에 동일한  $B$  값이 인가되어 최종 디지털 출력 값이  $d_{r1} \neq d_{r2} \neq d_{r3}, d_{g1} \neq d_{g2} \neq d_{g3}, d_{b1} \neq d_{b2} \neq d_{b3}$ 으로 9 채널의 전기-빛 입출력 곡선 별로 다르게 나타나게 된다.

따라서 채널-독립 역 특성화를 구현하기 위해서는 그림 6의 흐름도와 같이 채널 의존적인 값의 모델링, 전기-빛 입출력 곡선의 수정, GOG 모델의 역 전기-빛 입출력 곡선을 수행한 후 최대 자극치의 값을 이용하여 가중치를 부과하여 최종 디지털 값을 얻을 수 있다. 역 특성화 역시 CIEXYZ값들을 역행렬을 이용하여 계산하면 각각의 RGB채널에 해당하는 정규화된 휘도 값을 얻는다. 실험을 위해서 원색에 해당하는 RGB채널의 측정된 CIEXYZ값들을 이용하여 다음과 같이 계산한다.

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,max} & X_{g,max} & X_{b,max} \\ Y_{r,max} & Y_{g,max} & Y_{b,max} \\ Z_{r,max} & Z_{g,max} & Z_{b,max} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (3)$$

#### 3.1. 채널 의존적인 값의 모델링

원색의 RGB채널의 측정된 CIEXYZ값들을 역행렬을 통하여 정규화된 휘도 값으로 변환된다. 이 값들은

RGB원색의 측정된 값들이므로 휘도 값 역시 한 채널의 값만 존재해야 함에도 불구하고, 디스플레이 특성에 의해 채널에 의존적인 값들이 존재하게 된다.<sup>[4],[5],[13],[14]</sup>

본 논문에서는 이 값들을 간단한 수식으로 모델화하여 임의의 CIEXYZ값들이 입력으로 주어질 때 역행렬을 거친 정규화한 휘도 값에서 이 값의 2차 방정식으로 모델링하여 이 값들을 제거한다. 그림 7에서 원색 RGB 채널에 대해 채널 의존적인 값들이 각 입력 신호에 대해서 나타나 있다.

우선 원색의 RGB채널의 측정된 CIEXYZ값들을 역행렬을 통하여 정규화한 휘도 값으로 변환한다. 변환된 휘도 값은 측정된 CIEXYZ값의 디지털 값으로 다음과 같이 GOG 모델을 적용할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 R_{primary} &= \{k_{g, rp} [d_r / (2^N - 1)] + k_{o, rp}\}^{\gamma_{rp}} \\
 &\quad \text{if } \{k_{g, rp} [d_r / (2^N - 1)] + k_{o, rp}\} \geq 0 \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g, rp} [d_r / (2^N - 1)] + k_{o, rp}\} < 0 \\
 G_{primary} &= \{k_{g, gp} [d_g / (2^N - 1)] + k_{o, gp}\}^{\gamma_{gp}} \\
 &\quad \text{if } \{k_{g, gp} [d_g / (2^N - 1)] + k_{o, gp}\} \geq 0 \quad (4) \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g, gp} [d_g / (2^N - 1)] + k_{o, gp}\} < 0 \\
 B_{primary} &= \{k_{g, bp} [d_b / (2^N - 1)] + k_{o, bp}\}^{\gamma_{bp}} \\
 &\quad \text{if } \{k_{g, bp} [d_b / (2^N - 1)] + k_{o, bp}\} \geq 0 \\
 &= 0 \quad \text{if } \{k_{g, bp} [d_b / (2^N - 1)] + k_{o, bp}\} < 0
 \end{aligned}$$

여기서  $R_{primary}$ 는 디지털 R 채널의 측정된 CIEXYZ 값들을 역행렬을 통하여 정규화한 휘도 값이며, 다른 G, B채널 역시 동일하다. 이렇게 GOG 모델을 적용한 채널의 경우를 제외한 나머지 채널의 값은 0여야 함에도 불구하고 작은 오차 값을 가진다. 이러한 채널 의존적인 값은 식 (4)의 값들을 이용하여 다음의 수식과 같이 모델링 한다.

$$\begin{aligned}
 R_{g,error} &= a_{r,g} (G_{primary})^2 - a_{r,g} (G_{primary}) \\
 R_{b,error} &= a_{r,b} (B_{primary})^2 - a_{r,b} (B_{primary}) \\
 G_{r,error} &= a_{g,r} (R_{primary})^2 - a_{g,r} (R_{primary}) \\
 G_{b,error} &= a_{g,b} (B_{primary})^2 - a_{g,b} (B_{primary}) \quad (5) \\
 B_{r,error} &= a_{b,r} (R_{primary})^2 - a_{b,r} (R_{primary}) \\
 B_{g,error} &= a_{b,g} (G_{primary})^2 - a_{b,g} (G_{primary})
 \end{aligned}$$

$C_{i,error}$  ( $c = R, G, B$  and  $i = r, g, b$ )는  $i$ 채널에 의한  $C$ 채널의 채널 의존적인 값들이며,  $a$ 는 최적화

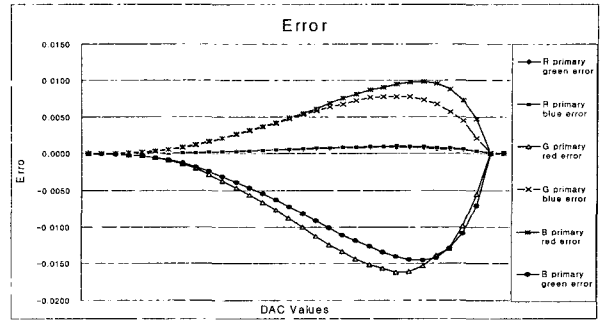


그림 7. 원색 RGB 채널의 채널 의존적인 값  
Fig. 7. Channel-dependent values of the primary RGB channels.

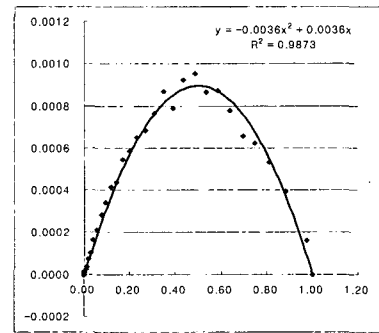


그림 8. 2차 방정식으로 모델링 되어진  $R_{g,error}$   
Fig. 8. The modeled  $R_{g,error}$  by second order polynomial.

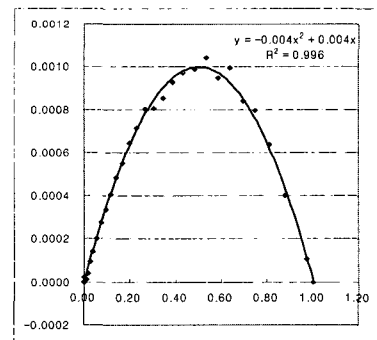


그림 9. 2차 방정식으로 모델링 되어진  $R_{b,error}$   
Fig. 9. The modeled  $R_{b,error}$  by second order polynomial.

알고리즘을 통해 구해진 상수이다. 그림 8과 9은 R 채널에 대해서 G 채널과 B 채널에 대한 모델링된 채널 의존값이다. 절편이 0인 2차방정식이며, 전체 채널에 대해서 데이터모델화 정도를 나타내는 추세선의 전체 평균이 0.962이다. 추세선의 값이 1이 될 경우 완벽한 모델화가 됨을 의미하며, 0이 될 경우 데이터를 전혀 모델화하지 못함을 의미한다. 채널 의존적인 값을 모델링하고 난 후 채널 독립적인 값을 다음식과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 R &= R_{primary} - R_{g,error} - R_{b,error} \\
 G &= G_{primary} - G_{r,error} - G_{b,error} \\
 B &= B_{primary} - B_{r,error} - B_{g,error}
 \end{aligned} \quad (6)$$

### 3.2. 전기-빛 입출력 곡선의 수정

식 (6)을 통해 얻어진 값들을 그대로 채널-독립 역 특성화의 입력으로 할 경우, 9 채널의 전기-빛 입출력 곡선이 다름에도 불구하고 RGB채널에 해당하는 각 3 채널에 들어가는 입력 값이 동일한 값이 입력된다. 그래서 각 3채널의 변수가 달라 3 채널의 출력값이 모두 다르게 나타난다.

그러므로 3채널의 채널 독립적인 전기-빛 입출력을 가지는 이 값들은 다시 각각의 채널에 맞는 9채널의 전기-빛 입출력 곡선에 해당하는 값들로 변환해야 한다.<sup>[6]</sup> 다음은 9채널의 채널-독립 전기-빛 입출력 곡선과 3채널의 전기-빛 입출력 곡선의 차를 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 \Delta R_i &= R_{i,forward} - R \\
 \Delta G_i &= G_{i,forward} - G \\
 \Delta B_i &= B_{i,forward} - B
 \end{aligned} \quad (7)$$

$\Delta C_i$  ( $C = R, G, B$  and  $i = X, Y, Z$ )는 각 9채널의 채널-독립 전기-빛 입출력과 채널 독립적인 값과의 차이이고,  $C_{i,forward}$  ( $C = R, G, B$  and  $i = X, Y, Z$ )는 특성화 과정에서 추정된 9 채널의 전기-빛 입출력 값이다. 이 값과 식 (6)으로 획득된 채널 독립적인 값을 합하면 9 채널-독립 특성화의 전기-빛 입출력 곡선과 동일한 입출력 관계가 된다. 그 후 특성화 과정에서 사용된 파라미터들을 이용하여 9 채널의 전기-빛 입출력 곡선의 역 과정을 통해 디스플레이 장치의 디지털 값을 다음과 같은 역변환 GOG 모델의 수식으로 추정한다.

$$\begin{aligned}
 d_{ri} &= [(2^N - 1)/k_{g,ri}]((R + \Delta R_i)^{1/\gamma_r} - k_{o,ri}) \text{ if } 0 \leq R \leq 1 \\
 d_{gi} &= [(2^N - 1)/k_{g,gi}]((G + \Delta G_i)^{1/\gamma_g} - k_{o,gi}) \text{ if } 0 \leq G \leq 1 \\
 d_{bi} &= [(2^N - 1)/k_{g,bi}]((B + \Delta B_i)^{1/\gamma_b} - k_{o,bi}) \text{ if } 0 \leq B \leq 1
 \end{aligned} \quad (8)$$

$d_{ci}$  ( $c = r, g, b$ , and  $i = X, Y, Z$ )는 9채널의 전기-빛 입출력 곡선의 역 과정을 통해 추정된 디지털 값이다.

### 3.3. 최대 자극치 값을 이용한 가중치 부여

9채널의 전기-빛 입출력 곡선의 역 과정을 통해 추

정된 디지털 값은 오차가 포함되어 있어 3개의 값이 모두 동일하지 않다. 그래서 각 RGB채널마다 3개의 디지털 값들은 원색 RGB채널의 최대 자극치의 비로 가중치를 주어 최종 디지털 값을 결정한다. 최대자극치의 값이 클수록 오차에 대한 민감도가 떨어져 추정된 디지털 값이 보다 정확하기 때문이다. 최종 디지털 값은 이 가중치를 두어 합한 수식에 의해 계산한다.

$$\begin{aligned}
 d_r &= \sum d_{ri} \times \frac{i_{r,max}}{X_{r,max} + Y_{r,max} + Z_{r,max}} \\
 d_g &= \sum d_{gi} \times \frac{i_{g,max}}{X_{g,max} + Y_{g,max} + Z_{g,max}} \\
 d_b &= \sum d_{bi} \times \frac{i_{b,max}}{X_{b,max} + Y_{b,max} + Z_{b,max}}
 \end{aligned} \quad (9)$$

여기서  $X_{max}$ ,  $Y_{max}$ ,  $Z_{max}$ 는 각 채널별로 가장 큰 디지털 값을 입력으로 주었을 때 출력되는 빛의 CIEXYZ 값이다.

## IV. 실험 및 결과

실험을 위해 암실환경에서 LCD 장치의 중심에 각 RGB채널별로 동일한 디지털 값이 8인 간격으로 32개 패치의 (가로: 디스플레이 장치의 높이/5, 세로: 디스플레이 장치의 높이/5) CIEXYZ값을 측정하였으며, 측정 장비는 분광방사휘도계 (spectroradiometer, Minolta CS-1000)이다. 디스플레이 장치는 SAMSUNG SyncMasterMagic CX171T이며 네 번의 유효한 측정 데이터로 블랙 레벨의 삼자극치를 추정하였으며, 최적화 알고리즘을 적용하여 GOG 모델의 변수를 추정하였다. 또한 결과비교를 위해, 역 특성화 수행을 한 RGB 결과 값들을 3차원 참조표를 사용하여 CIEXYZ값으로 변환하였으며, 이 3차원 참조표의 평균 색차는 0.23이다.

### 4.1. 디스플레이 특성화 실험

LCD(SAMSUNG SyncMasterMagic CX171T) 장치의 특성화를 위해 다항 회귀방정식, 3 채널 GOG 모델과 GOG 모델을 기반으로 한 9 채널-독립 특성화를 수행하였으며, 특성화 성능을 비교하기 위하여 특성화 오차를 구하였다. 다항 회귀방정식을 적용하기 위해서는 전체 디지털 값을 등 간격으로 216개의 패치의 CIEXYZ 값을 측정하고 이를 이용하여 다항 회귀방정식의 상수를 구하였다. 3 채널 GOG 모델과 GOG 모델

을 기반으로 한 9 채널-독립 특성화를 수행하기 위해서 Red, Green, Blue 채널별로 32개의 패치를 CIEXYZ 값을 측정하고, 이를 이용하여 특성화를 수행하였다.

그림 1, 2, 3에서 전술한 바와 같이 각 채널에 대한 전기-빛 입출력 곡선을 나타내고 있다. 그림 1은 최적화된 R 채널의 입출력 특성 곡선이다. 가로축은 정규화된 디지털 입력 값이며, 세로축은 정규화한 CIEXYZ 값이다. 각 RGB채널당 32개의 점은 채널별 등 간격의 디지털 입력 값에 대한 자극치의 정규화한 측정값이며 곡선들은 채널별로 모델링 한 값들로써 예측된 세 채널의 정규화한 자극치를 나타낸다. 그림 2와 3은 각각 최적화된 G, B 채널의 전기-빛 입출력 곡선을 나타내고 있다. 기존 3채널 GOG 모델의 경우는 그림 1에서 3과 같이 X채널과 Z채널의 전기-빛 입출력 곡선이 Y채널과는 상당한 차이가 있음에도 불구하고, Y 채널의 전기-빛 입출력 곡선만을 이용하여 X와 Z의 값까지 추정하므로 특성화 오차가 커진다.

표 1은 LCD 장치의 추정된 GOG 변수값이다. 일반적으로  $k_g$ 와  $k_o$  값의 합은 1이 되어야 하지만, 그림 1, 2, 3과 같이 최대 디지털 값 이전에 자극치가 포화되어 이 두 값의 합이 1보다 크다. 추정치가 가장 큰 자극치보다 같아지도록 1보다 큰 값은 1로 나타낸다. 표 2는 각 특성화 방법별로 특성화 오차를 나타내었다. 전체 디지털 입력 값에서 샘플링 한 216(6×6×6)개의 측정치와 그 디지털 입력 값에 대한 추정치 간의 CIELAB 좌표계에서의 평균 색차와 최대색차를 보여준다. 일반적으로 평균 색차가 3이하인 경우 사람이 인식하기 힘들며, 3 이상 6이 하의 경우 인식은 하되 받아 들일 정도이다.

표 1. LCD모니터의 특성화 각 채널별 파라미터  
Table 1. The parameter of channel-independent characterization of the LCD display panel for each channel.

	$k_g$	$k_o$	$\gamma$
$R_X$	1.0151	-0.00093	2.3794
$G_X$	1.0338	-0.00100	2.3467
$B_X$	1.0388	-0.00102	2.2246
$R_Y$	1.0156	-0.00108	2.3711
$G_Y$	1.0353	-0.00096	2.2975
$B_Y$	1.0191	-0.00104	2.4099
$R_Z$	1.0771	-0.00023	1.8158
$G_Z$	1.0506	-0.00109	2.1039
$B_Z$	1.0399	-0.00103	2.2186

표 2. LCD 장치의 정방향 특성화 결과  
Table 2. The forward characterization error of the LCD device.

	Polynomial regression		3 channel GOG model		Nine channel-independent GOG model	
	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$
216 patches	4.02	20.68	5.63	19.50	3.07	12.61

도이다.

따라서 다항 회귀 방정식이나 GOG모델의 경우는 사람이 쉽게 인식할 정도이지만 채널-독립 특성화는 거의 인식하지 못할 정도이며, 특히 최대색차가 다른 방법들에 비해 적게 나므로 색이 특별히 달라 보이는 특이점이 크게 발생하지 않는다.

4.2. 디스플레이 역 특성화 실험

LCD 장치의 역 특성화를 위해 동일하게 다항 회귀 방정식, 역 3 채널 GOG 모델과 GOG 모델을 기반으로 한 9 채널-독립 역 특성화를 수행하였으며, 특성화 성능을 비교하기 위하여 역 특성화 오차를 구하였다. 특성화에서 측정된 데이터를 이용하여 역 특성화 다항 회귀방정식의 상수를 구하였으며, 역 3 채널 GOG 모델과 GOG 모델을 기반으로 한 9 채널-독립 역 특성화 역시 특성화에서 측정된 데이터를 이용하여 값을 획득한다. 역 3 채널 GOG 모델과 GOG 모델을 기반으로 한 9 채널-독립 역 특성화는 특성화를 통해 구한 최적화 변수

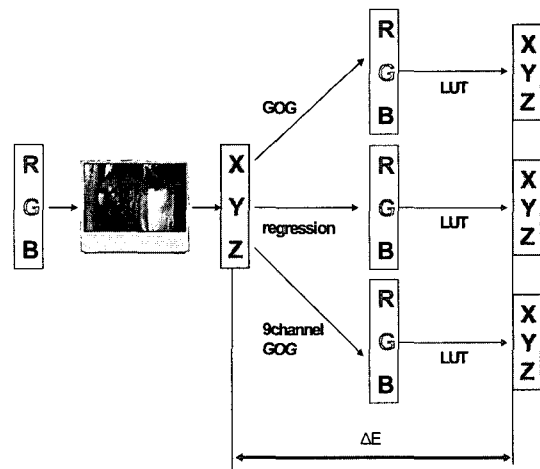


그림 10. 역 특성화 실험의 결과 비교하기 위한 방법  
Fig. 10. Comparing method for the inverse characterization.

표 3. LCD 장치의 역 특성화 결과  
Table 3. The inverse characterization error of the LCD device.

	Polynomial regression		3 channel GOG mode		Nine channel-independent GOG model	
	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$	$\Delta E_{avg}$	$\Delta E_{max}$
216 patches	4.91	15.92	6.92	15.27	3.24	8.73

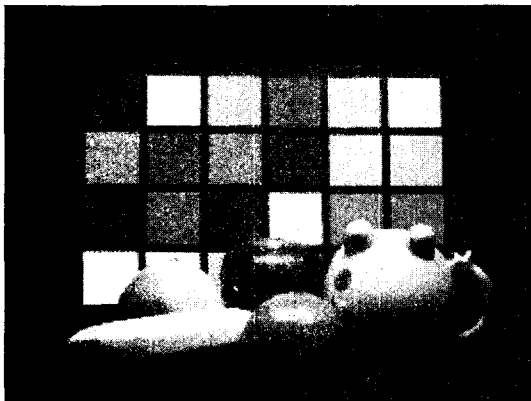


그림 11. 역 특성화를 하기 위한 실제 사진  
Fig. 11. Real image for inverse characterization.

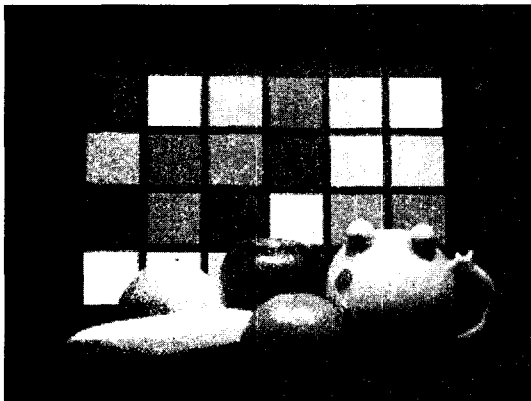


그림 12. 3채널 GOG 모델의 역 특성화를 한 결과 그림  
Fig. 12. Result image for the inverse characterization of 3 channel GOG model.

를 그대로 사용하여 역 특성화를 수행한다. 역 특성화의 최종 결과는 디지털 값으로 나타나는데, 이 값의 CIELAB 값을 알기 위해서는  $\Delta E_{avg}$  0.23인 정밀한 3차원 참조표를 이용하여 재 변환한다.

그림 10는 최종 결과를 비교하기 위한 과정을 나타내었다. 표 3은 각 역 특성화 방법별로 역 특성화 오차를 나타내었다. 전체 디지털 입력 값에서 샘플링 한 216(6×6×6)개의 측정치와 그 디지털 입력 값에 대한 추정치 간의 CIELAB 좌표계에서의 평균 색차와 최대 색차를 보여준다. 역 특성화 오차 역시 각 특성화 방법의 특

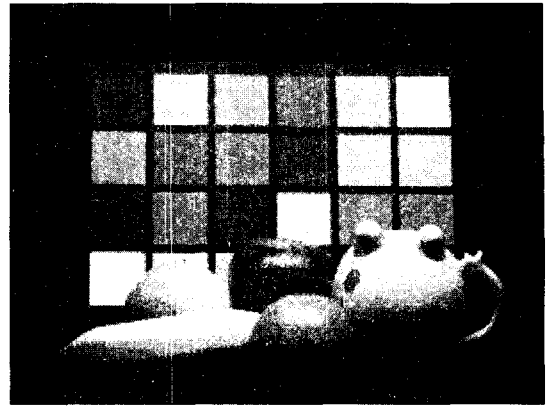


그림 13. 다항 회귀방정식의 역 특성화를 한 결과 그림  
Fig. 13. Result image for the inverse characterization of polynomial regression.

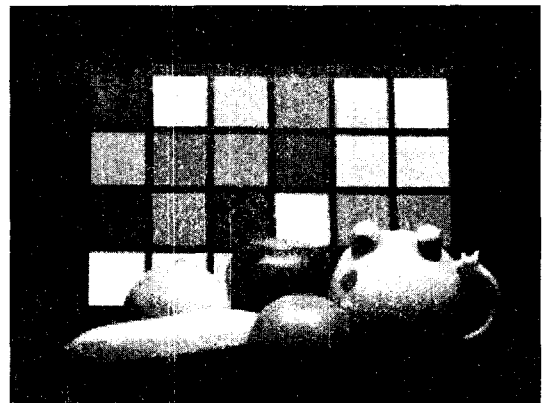


그림 14. 9 채널-독립 역 특성화를 한 결과 그림  
Fig. 14. Result image for the 9 channel-independent inverse characterization.

성화 오차와 거의 유사하며, 다항 회귀 방정식이나 GOG모델의 경우는 사람이 쉽게 인식할 정도이지만 채널-독립 특성화는 거의 인식하지 못할 정도이다. 특히 최대색차가 다른 방법들에 매우 적으므로 색이 특별히 달라 보이는 특이점이 거의 발생하지 않는다.

그림 11에서 그림 14는 실영상을 이용하여 기존의 방법과 제안한 방법으로 LCD 디스플레이 장치에 실제로 재현되는 영상을 나타낸 것이다. 그림 11은 실험을 위한 입력 영상이다. 그림 12는 3채널 GOG 모델을 적용한 결과 영상이고, 13은 다항 회귀 방정식을 적용한 결과 영상이며, 14는 제안한 방법으로 재현된 영상이다. 그림 11의 Macbeth 차트에 분포해 있는 색이 제안한 방법으로 재현 했을 경우, 기존의 방법에 비해 유사하게 재현되는 것을 알 수 있다. 색차 비교 실험에서도 도출 되었듯이 제안한 방법을 적용할 경우, 전반적으로 변환의 오차가 감소하여 시각적인 색 변화 인지도도 줄어들게 된다.



## V. 결 론

본 논문에서 제안한 방법은 입력 표준 자극치를 디스플레이 장치에 대응되는 신호로 변환하는 역 특성화 기법을 제안하였다. 임의의 자극치가 입력 되었을 경우, 채널 의존적인 값들을 모델링하고, 전달 특성 곡선을 보상하여 GOG 모델 기반의 9 채널-독립 역 특성화를 수행하였다. 실험 결과를 통해 동일한 측정 데이터를 이용하였음에도 불구하고 기존 3채널 GOG 모델보다 정확한 결과를 보였다 또한 많은 양의 측정 데이터를 이용한 다항 회귀 방정식 모델보다도 정확한 특성화 및 역 특성화가 이루어 졌으며, 계산의 복잡성도 크게 증가하지 않는다. 실험에 의해 인간 시각을 고려한 CIELAB 색 공간의 색차가 인간 시각이 인지 할 수 없는 오차( $\Delta E_{ab} < 3$ )보다 조금 큰 3.24로써 사람이 거의 인지 할 수 없는 오차임을 확인 할 수 있었다.

## 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] G. Sharma, "LCD versus CRTs color-calibration and gamut considerations," *Proceeding of the IEEE*, vol. 90, no. 4, pp. 605-622, April 2002.
- [7] 박기현, 이명영, 이철희, 하영호, "개선된 S-curve 모델과 RGB 칼라 LUT를 이용한 모니터와 모바일 디스플레이 장치간 색 정합," *대한전자공학회*, vol. 41, no. 6, pp. 33-41, 2004년 11월.
- [8] P. C. Hung, "Colorimetric calibration in electronic imaging devices using a look-up-table model and interpolation," *Journal of Electronic Imaging*, vol. 36, no. 1, pp. 53-61, Jan. 1993.
- [9] H. R. Kang, *Color Technology for Electronic Image Device*, SPIE Optical Engineering Press, 1996.
- [10] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models*, Addison-Wesley, 1998.
- [11] J. Y. Hardeberg, *Acquisition and Reproduction of Color Images: Colorimetric and Multispectral Approaches*, Dissertation. com, 2001.
- [12] R. S. Berns, S. R. Fernandez, and L. Taplin, "Estimating black-level emissions of computer-controlled displays," *Color research and Application*, vol. 28, no. 5, pp. 379-383, Oct. 2003.
- [13] 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.
- [14] N. Tamuro, 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.

---

 저 자 소 개
 

---



임 혜 봉(정회원)  
 2001년 2월 경북대학교 전자전기  
 공학부 학사 졸업.  
 2004년 8월 경북대학교  
 전자공학과 석사 졸업.  
 2004년 8월~현재 LG전자  
 단말기연구소 재직중.

<주관심분야 : 칼라 영상처리, 디스플레이 특성화>

조 양 호(학생회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제41권 SP편 제2호 참조

박 기 현(학생회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제41권 SP편 제6호 참조

하 영 호(정회원)  
 대한전자공학회논문지  
 제38권 SP편 제3호 참조