

논문 2007-44SP-4-8

고휘도 디스플레이의 색상이동모델과 색 보정

(Hue Shift Model and Hue Correction in High Luminance Display)

이 태 형*, 권 오 설*, 박 태 용*, 하 영 호**

(Tae-Hyoung Lee, Oh-Seol Kwon, Tae-Yong Park, and Yeong-Ho Ha)

요 약

인간 시각은 고휘도를 접할 경우 색 민감도가 떨어진다. 이러한 현상으로 인해, 인간이 고휘도와 일반 휘도를 가지는 두 디스플레이를 볼 때, 측정 상 동일한 색을 가지는 패치에 대해 두 색이 다르다고 인지하게 되고, 이를 색상이동 현상이라 한다. 본 논문에서는 고휘도와 일반휘도 디스플레이의 색상이동현상을 모델링하고, 두 디스플레이의 색이 인간시각에 동일하게 인지되도록 하는 색 보정 방법을 제안하였다. 색상이동모델은 색상 매칭 실험으로써 결정 된다. 먼저 실험은 고휘도와 일반휘도 디스플레이의 3단계 밝기에서 비율을 일정하게 유지하여 수행한다. 실험에 쓰이는 패치는, CIELAB 색 공간에서 밝기와 채도를 고정하여 색상만 변화하는 패치를 사용한다. 실험에서 관찰자는 휘도차가 나는 두 패치를 동시에 보면서, 고휘도 디스플레이의 인지되는 색상이 일반 휘도의 디스플레이와 같을 때까지 색상 값을 수정 하고, 수정된 색상 값의 차이가 색상이동양으로 사용된다. 실험에서 얻어진 각 패치의 색상 이동량은 일곱 개의 구간으로 나뉘어 모델링 되어 색상이동모델로 사용된다. 고휘도 디스플레이의 색 보정은 픽셀단위로 수행되며, 먼저 입력 RGB 값을 CIELAB 값으로 변환 후, 색상 값을 보정하기 위하여 LCh(lightness, chroma, hue)값으로 변환한다. 여기서, 색상 값을 색상이동모델을 사용하여 수정한 후, 역 과정을 통하여 출력 RGB값을 추정한다. 평가를 위해 관찰자의 선호도 테스트를 하였고, 대부분의 관찰자는 고휘도 디스플레이에서 색상이동모델이 적용된 영상이 일반휘도를 가지는 디스플레이의 영상과 인지되는 색상이 유사하다고 판단하였다.

Abstract

The human eye usually experiences a loss of color sensitivity when it is subjected to high levels of luminance, and perceives a discrepancy in color between high and normal-luminance displays, generally known as a hue shift. Accordingly, this paper models the hue-shift phenomenon and proposes a hue-correction method to provide perceptual matching between high and normal-luminance displays. The value of hue-shift is determined by perceived hue matching experiments. At first the phenomenon is observed at three lightness levels, that is, the ratio of luminance is the same between high and normal-luminance display when the perceived hue matching experiments are performed. To quantify the hue-shift phenomenon for the whole hue angle, color patches with the same lightness are first created and equally spaced inside the hue angle. These patches are then displayed one-by-one on both displays with the ratio of luminance between two displays. Next, the hue value for each patch appearing on the high-luminance display is adjusted by observers until the perceived hue for the patches on both displays appears the same visually. After obtaining the hue-shift values, these values are fit piecewise to allow shifted-hue amounts to be approximately determined for arbitrary hue values of pixels in a high-luminance display and then used for correction. Essentially, input RGB values of an image is converted to CIELAB values, and then, LCh (lightness, chroma, and hue) values are calculated to obtain the hue values for all the pixels. These hue values are shifted according to the amount calculated by the functions of the hue-shift model. Finally, the corrected CIELAB values are calculated from corrected hue values, after that, output RGB values for all pixels are estimated. For evaluation, an observer's preference test was performed with hue-shift results and Almost observers conclude that the images from hue-shift model were visually matched with images on normal luminance display.

Keywords : 색상이동현상, 색 보정, 고휘도 디스플레이

* 학생회원, ** 평생회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부

(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

※ 본 논문은 교육인적자원부, 산업자원부, 노동부의 출연금 및 보조금으로 수행한 최우수실험실지원사업의 연구결과임.

접수일자: 2007년4월18일, 수정완료일: 2007년6월12일

I. 서 론

최근 디스플레이 장치는 대형화, 고휘도, 및 응답속도 면에서 매우 향상된 성능을 가진다. 또한 색역과 색 표현 능력이 향상되어 선명한 화질을 재현 할 수 있게 되었다. 특히 최근 디스플레이의 최대 밝기는 400~500 cd/m²으로 대부분의 디스플레이가 가지는 밝기의 약 4~5배로 기존의 디스플레이와 큰 차이를 가진다. 이렇게 휘도 차이가 크게 나는 최근의 디스플레이와 기존의 일반휘도(약 100cd/m²)를 가지는 디스플레이를 관찰 할 때, 관찰자는 두 디스플레이에 띄워진 휘도는 차이가 나는 측정 상 동일한 색(xy-plane)을 가지는 패치에 대해 두 패치의 색이 다르다고 인지를 하게 된다. 이러한 현상은 인간 시각이 휘도의 영향을 받아 나타나는 현상으로 색상이동현상이라 한다^[1]. 인간 시각은 휘도의 차이가 크게 나는 대상에 대해 같은 색을 가지더라도 휘도에 의한 시세포의 민감도 변화에 따라 두 색을 다르게 인지하게 되는 특성을 가지고 있다^{[2][3]}. 이와 같이 휘도차이가 크게 나는 두 디스플레이에서 관찰자는 패치의 색을 다르게 인지함으로써, 두 패치의 색상이 같도록 인지시켜주는 고휘도 디스플레이 패치의 색 보정에 대한 알고리즘이 필요하다.

이러한 휘도 차에 따른 인지되는 색상의 차이에 대한 연구는 Bezold-Brücke^[1]에 의해 처음으로 행하여 졌다. 그는 단파장을 관찰할 때, 휘도의 변화에 따라 단파장의 색이 다른 파장의 단파장의 색으로 인지되는 것을 관찰하고, 이를 색상이동(hue shift)으로 발표하였다. Weale^[2]과 Vos^[3]는 이 현상을 인간시각의 순응현상으로 설명하였다. 그들의 이론에 따르면, 입력 자극에 가장 민감한 시세포는 입력자극의 강도가 강해짐에 따라 그 강도에 순응한다는 것이다. 결과적으로 LMS 시세포의

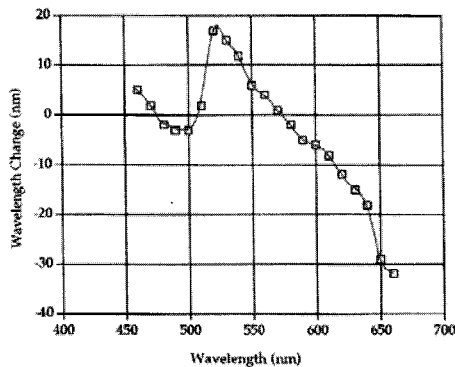


그림 1. 색상이동모델을 만들기 위한 흐름도
Fig. 1. Procedure for modeling of hue shift.

비율이 변화하면서 인지되는 색이 달라지는 것이다. 이러한 연구와 함께 색상이동에 대한 많은 연구가 있었다.

Purdy^[1]는 단파장을 사용하여, Bezold-Brücke의 색상이동을 실험을 통하여 그림 1.과 같이 나타내었다. R.W.G. Hunt^[4]는 단파장이 아닌 프린트된 패치의 휘도에 따른 색상의 변화를 설명하기 위하여 단일 패치를 사용한 실험을 통해 색상이동을 설명하였고, 이는 Hunt94u color appearance model에 적용되었다. 반면, Ralph W. Pridmore^[5]는 색상이동현상을 설명하기 위해 단일 패치를 사용한 실험은 한계가 있다고 설명하고, 두 개의 패치를 사용한 색 매칭 실험을 통해 색상이동 현상을 조사하였다. 최근 Shiila M. Imhoff^[6]는 단파장에 대하여 인간의 시각에서 망막 주변의 색상이동현상을 관찰하여, 망막과 망막 주변의 색상이동이 다르게 나타난다는 것을 증명하였고, David L. Bimler^[7]는 단파장에 대하여 제1 색맹을 가지는 관찰자와 보통 시각을 가지는 관찰자에 대하여 색상이동현상을 실험하고, 그 결과가 다르게 나타남을 연구하였다.

이러한 기존의 연구에서, 먼저 단파장에 대한 색상이동의 연구는 고휘도 디스플레이에 직접적으로 적용하는데 문제가 있다. 이는 고휘도 디스플레이가 단파장이 아닌 가시광선 영역에 걸친 광대역 스펙트럼 분포를 가지기 때문이다. 그림 2.에서처럼 단파장의 경우, 휘도의 차이에 대한 색상이동양($\Delta\lambda$)이 정해진다면 그 값을 휘도차이가 나는 대상에 적용시켜주면 휘도차이가 나는 두 단파장은 관찰자에게 동일한 색으로 인지된다. 그러나 디스플레이의 패치의 경우, 가시 영역에 대한 스펙트럼 분포를 가지므로 단파장에 대한 색상이동양을 적용할 수 없다. 또한, Hunt와 Prodmore의 프린트된 패치를 사용하여 나타난 색상이동의 양은 디스플레이의 색상이동양과는 다른 결과 값을 가진다.

따라서 본 논문에서는 광대역 스펙트럼 밴드의 특성을 가지는 고휘도 디스플레이의 패치를 CIELAB 색공

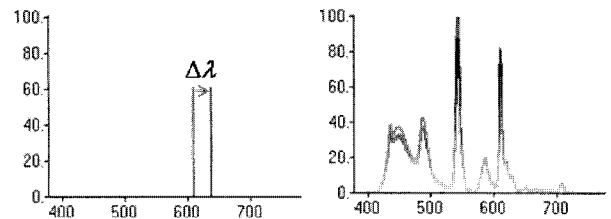


그림 2. 단파장의 색상이동과 디스플레이 패치의 색상이동

Fig. 2. Hue shift with a monochromatic stimulus and a display patch.

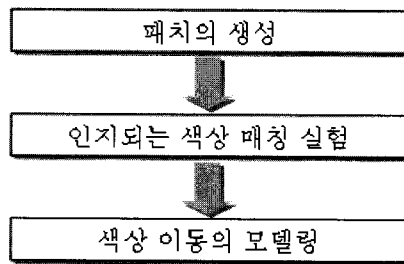


그림 3. 색상이동모델을 만들기 위한 흐름도
Fig. 3. Procedure for modeling of hue shift.

간의 색상(hue)의 값으로 나타내고, 휘도의 차이에 의한 색상이동현상을 제안된 실험을 통해 색상(hue)값의 차이로 나타낸다. 그 후, 실험결과를 모델링하고, 이 모델을 통해 일반 휘도 디스플레이와 고휘도 디스플레이의 패치에 대해 인지되는 색상이 동일하도록 색상을 보정하여주는 방법을 제안하였다. 첫째로, 고휘도 디스플레이와 일반휘도 디스플레이에 나타나는 패치에 대한 색을 제안하였다. 실험에 앞서, 패치는 CIELAB 색 공간 상이동양을 알아내기 위하여, 인지되는 색상 매칭 실험에서 생성하여 디스플레이의 패치를 색상(hue)으로 나타내면서, 휘도(lightness)와 채도(chroma) 값의 변화 없이 색상(hue)값만을 조정할 수 있는 패치를 생성할 수 있다. 먼저, 디스플레이 패치의 어두운 부분에서 밝은 부분까지 밝기의 색상이동현상을 알아내기 위해 디스플레이의 밝기(lightness)의 값을 40, 60, 80의 3단계로 나누어 패치를 생성하여 관찰하였다. 각 밝기의 단계에서 동일한 간격을 갖도록 하는 색상 패치를 24개씩 생성하여 전체 색상에 대한 색상이동을 관찰 할 수 있도록 하였다. 다음으로, 인지되는 색상 매칭 실험을 위하여, 고휘도 디스플레이와 일반 휘도를 가지는 디스플레이를 특성화 하여 입력에 대하여 정확한 색상 값을 표현하도록 하고, 암실에 설치하였다. 실험은 휘도 차이가 나는 두 패치를 동시에 보고 색상의 차이를 판단하는 방법을 선택하였다. 생성된 패치를 두 디스플레이의 밝기 차이를 고려한 휘도 차이를 두고 동시에 나타낸 후, 관찰자는 고휘도 디스플레이의 패치가 일반휘도 디스플레이 패치의 색상과 동일하게 인지될 때 까지 고휘도 디스플레이 패치의 색상 값을 조절하여, 조절하기 전의 색상 값과 조절한 후의 색상 값의 차이로 색상의 이동양을 나타내었다. 실험 결과의 색상이동양은 CIELAB 색공간의 차이, 즉 측정을 기반으로 한 색상 값의 차이가 된다. 이 실험은 각 밝기 단계에서 24개의 패치에 대해 여러 관찰자에 의해 반복적으로 수행되어 그 평균값을 색상이동양으로 지정하였다. 둘째로, 이렇

게 획득된 색상이동 값은 실험자에 의해 분포를 가지므로 1패치에 대해 1개의 색상이동양을 나타내기 위하여 분포의 평균값을 취한다. 그 후, 색상의 전체에 대한 색상이동양을 결정하기 위하여 평균이 취해진 결과는 7개의 정현곡선으로 모델링 되어 색상이동모델로 사용된다. 마지막으로 색상이동 모델은 CIELAB 색 공간에서 적용되어 고휘도 디스플레이의 색상을 보정하는데 사용된다. 먼저 입력 RGB값은 장치특성화를 통해서 CIELAB값으로 변환되고, 그리고 색상 값만을 찾아내기 위해 LCh(lightness, chroma, hue)값이 계산되어진다. 그리고 입력 색상에 대해 색상이동모델이 적용되어 색상이동양이 결정되고, 그 색상이동양이 입력 색상 값에 적용되어 색상의 수정이 이루어진다. 수정된 LCh값을 통해서 CIELAB값이 다시 계산되어지고, 최종적으로 이 값은 역 과정 특성화를 통해 출력 RGB를 추정하는데 사용된다. 제안된 색상이동모델과 색상 수정 방법의 효과는 관찰자의 선호도 테스트를 통해서 증명이 되고, z-score^[8]로 그 결과를 나타내었다. 실험결과에서 대부분의 관찰자는 고휘도 디스플레이에서 색상이동모델이 적용된 영상이 일반휘도를 가지는 디스플레이의 영상과 인지되는 색상이 유사하다고 판단하였다.

II. 고휘도 디스플레이에서의 색상이동

고휘도 디스플레이의 색상이동은 관찰자에 의해 제안된 인지되는 색상 매칭 실험으로 통해 결정된다. 그림 3.은 색상이동모델을 완성하기 위한 전체 흐름도를 나타낸다. 첫 번째로, 실험에서 사용될 두 디스플레이에 띄울 패치들을 생성한다. 디스플레이 패치는 광대역 스펙트럼 분포를 가지므로 색상의 정보만을 가지기 위해 CIELAB공간에서 생성되고, 밝기(lightness) 값과 채도(chroma) 값은 유지를 한 채 색상 값만의 변화로 만들어진다. 그 후 생성된 패치를 사용하여 두 패치를 동시에 보면서 고휘도 디스플레이 패치의 색상만을 조절하여 색상이동양을 찾아내는 인지되는 색상 매칭 실험을 수행하고, 그 결과 값을 색상의 이동양으로 결정한다. 마지막으로 색상이동모델은 분포된 실험 결과 값의 평균값을 구한 후 구간별로 모델링하여 생성된다.

실험에 앞서 먼저 고휘도 디스플레이로써 최대 휘도 432.9cd/m^2 을 가지는 LZ-10 LCD가 준비되고, 일반 휘도 디스플레이로써 최대휘도 114.6cd/m^2 을 가지는 EIZO 966T CRT가 준비 되었다. 패치의 정확한 생성을 위하여 두 디스플레이는 4면체(tetrahedral) 보간법을 기반

표 1. 고휘도와 일반휘도 디스플레이의 특성화 오차
Table 1. Evaluation of characterization.

ΔE_{ab}	CRT	LCD
평균 ΔE_{ab}	0.641	1.14
최대 ΔE_{ab}	1.82	2.56

으로 한 3D-LUT 방법^[9]과 GOG-model^[10]방법으로 각각 특성화 되었다. 특성화의 평가에서 216개의 테스트 패치가 사용되었고, 특성화 오차는 CIELAB 색차를 사용하여 표 1.과 같이 나타나며, 수용할 수 있는 오차 결과가 나왔다.

1. 실험을 위한 패치의 생성

본 논문에서 고휘도 디스플레이의 색 보정은 단지 색상(hue)만을 고려하여 이루어진다. 이는 디스플레이의 패치는 단파장을 가지는 것이 아니라 광대역 스펙트럼 분포를 가지므로 단파장의 패치를 생성하지 못하고, 또한 휘도는 일정한 값을 유지할 한 채 디스플레이가 가지는 측정 상 동일한 색 좌표를 가지는 패치에 대해 색상이동양을 관찰하여 디스플레이에 적용하는 것이 본 논문의 목적이기 때문이다. 그러므로 인지되는 색상 매칭 실험을 위한 패치는 CIELAB 공간에서 생성된다. 이 색 공간에서 패치를 생성할 때 밝기(lightness)값과 채도(chroma)값을 고정한 채 색상(hue)값만을 변화 시킬 수 있다. 먼저 디스플레이의 어두운 부분에서 밝은 부분까지의 색상이동양을 알아내기 위해 먼저 밝기를 40, 60, 80의 세단계로 나누고 결정하고, 각 단계별로 채도

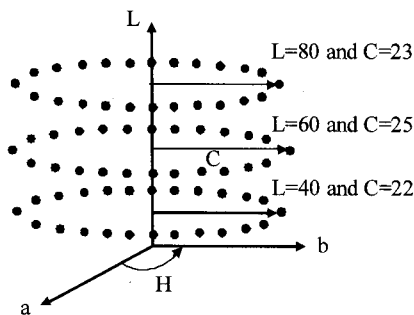


그림 4. CIELAB 색 공간에서 생성된 패치
Fig. 4. Created patches in CIELAB color space.

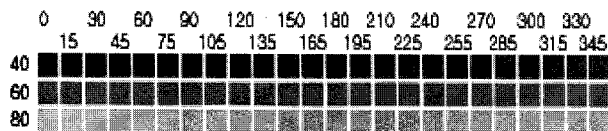
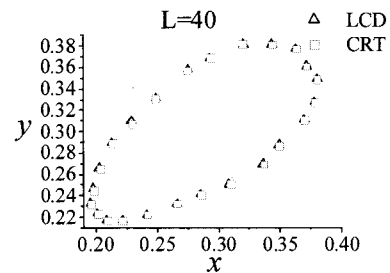
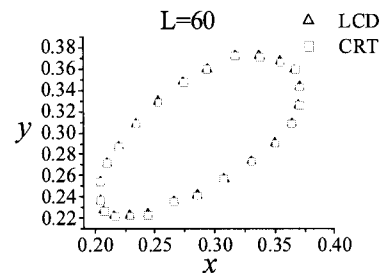


그림 5. 각 밝기 단계에서 생성된 패치
Fig. 5. Created patches at each lightness level.

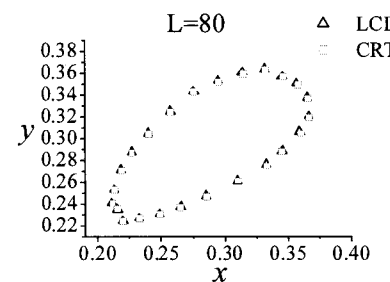
값을 22, 25, 23으로 고정시킨다. 이 값들은 디스플레이의 색역을 벗어나지 않으면서 채도의 값을 유지한 채 색상의 전 영역에 패치를 생성할 수 있는 최대 채도 값을 나타낸다. 위와 같이 각 밝기의 단계에서 채도 값을 고정한 채 24개씩의 동일한 간격을 가지는 패치들을 생성하여 제안된 실험에 사용된다. 그림 4.는 CIELAB공간에서 생성된 패치들을 나타내고, 그림 5.는 각 밝기 단계에서 색상에 대해 실제 생성된 패치들을 보여준다. 생성된 패치는 두 디스플레이에 각각 띄워지며, 이때 띄워진 패치의 휘도는 4배가 된다. 이는 두 디스플레이의 최대 휘도차가 거의 4배임을 고려한 것이다. 그림 6.은 LCD와 CRT에 각각 띄워진 패치를 CS-1000 spectroradiometer로 측정된 것이다. 그림에서 두 디스



(a)



(b)



(c)

그림 6. 측정된 패치의 색좌표 값
Fig. 6. Chromaticity values of created patches.

플레이는 거의 같은 xy 값을 가짐을 확인할 수 있다. 측정 결과 색 좌표계에서 Euclidean의 거리로 각 밝기 단계에 대한 평균 차이는 각각 0.000815, 0.000495, 0.000598로 인간의 눈이 인지할 수 없는 차이를 나타낸다. 반면 두 디스플레이에 띄워진 패치의 밝기는 각 밝기의 단계에서 CRT의 경우 10.0cd/m^2 , 26.0cd/m^2 , 51.0cd/m^2 으로 측정되었고, LCD의 경우 39.5cd/m^2 , 100.5cd/m^2 , 201.2cd/m^2 로 측정되어 밝기의 비가 약 4배가 됨을 나타낸다.

2. 인지되는 색상 매칭 실험

인지되는 색상 매칭 실험의 목적은 생성된 패치에 대하여 고휘도 디스플레이와 일반 휘도 디스플레이 간의 색상이동양을 결정하는 것이다. 실험 방법은 휘도 차이가 나는 두 패치를 동시에 보면서 색상이동양을 결정하는 것으로 하였다^{[5][11]}. 실험은 빛이 들어오지 않는 암실에서 행하여지고, 그림 7.와 같이 두 디스플레이는 관찰자의 눈높이에 맞춰 평행하게 놓여진다. 이때, 패치의 크기는 디스플레이 높이의 1/5인 11cm가 되고, 관찰거리는 디스플레이 높이의 4배인 156cm로써 LCD 디스플레이의 측정 기준을 관찰자의 실험에 적용하였다^[12].

실험을 위하여 26-34세 사이의 7명의 관찰자가 동원되었고, 모두 칼라 이미지 처리 분야의 연구자로 일반적인 칼라 시각을 가지고 있다.

관찰자는 실험에 앞서 암실에서 10분간의 암순응 시간을 가진다. 그림 8.에서처럼 두 디스플레이에 동시에 띄워진 패치는 4배의 휘도차를 가지며, 동일한 색 좌표를 가진다. 다음으로 관찰자는 CRT의 패치를 5초 동안 관찰하고, LCD의 패치를 관찰한다. 만약 관찰자가 두

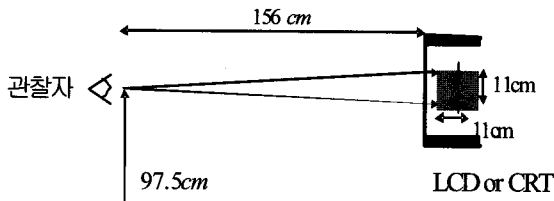


그림 7. 실험 환경
Fig. 7. Environment of experiments.

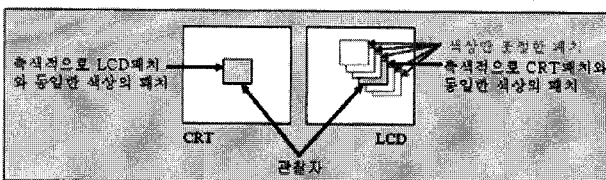


그림 8. 인지되는 색상 매칭 실험
Fig. 8. Perceived hue matching experiments.

패치의 색이 다르다고 인지를 하게 되면, 관찰자는 LCD 패치의 색상 값을 CRT 패치의 색상과 동일하다고 인지 될 때 까지 조절한다.

색상이동양은 조절하기 전의 고휘도 디스플레이 패치의 색상 값과 조절한 후의 색상 값의 차로 나타낼 수 있다. 관찰자는 이러한 실험을 각 밝기 단계의 모든 패치에 대해 4번씩 수행하여, 각 패치 당 28번의 실험 결과를 얻을 수 있었다.

3. 색상 매칭 실험 결과

표 3.은 인지되는 색상 매칭 실험의 결과이다. 표에서 제일 윗줄은 색상 값을 나타내고, 제일 왼쪽의 세로 줄은 색상이동양의 단계를 나타낸다. 실험에서 LCD의 색상 값을 조절할 때, 밝기와 채도는 고정된 채 색상의 값만 바뀌는 패치를 미리 생성해서 사용하게 되며, 이때 생성된 패치의 간격을 나타낸다. 실험 결과 값이 단계로 나타난 이유는 각각의 생성된 패치에서 인간시각이 인지하는 색상의 변화량이 다르기 때문이다. 예를 들어 붉은색 부분은 색상의 변화량이 3°가되면 색상의 변화 차이를 인지하는 반면, 푸른색 부분은 색상의 변화량이 5°의 차이가 있어야 색상 변화의 차이를 인지한다. 색상의 변화가 인지되는 양은 실험을 통해서 결정 되었으

표 2. 각 패치에서 색상변화가 인지되는 색상의 변화량

Table 2. Discriminable-hue values for each patch for whole hue angle.

hue	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165
L=40	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°
L=60	4°	4°	4°	4°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°	3°
L=80	4°	5°	5°	5°	3°	4°	3°	3°	3°	3°	3°	5°
hue	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345
L=40	3°	4°	5°	5°	5°	4°	4°	3°	3°	3°	3°	3°
L=60	3°	4°	5°	5°	5°	4°	4°	3°	3°	3°	3°	3°
L=80	5°	5°	6°	6°	5°	4°	3°	3°	3°	3°	3°	3°

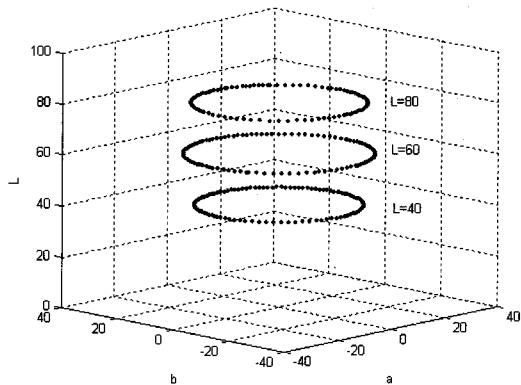


그림 9. 색상 조절에 사용되는 패치
Fig. 9. Perceived hue matching experiments.

표 3. 색상 매칭 실험의 결과

Table 3. Results of hue matching experiments.

(a) L=40일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	0	1	0	1	0	0	2	4	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0
-2	0	0	0	6	2	2	4	1	1	9	8	5	1	1	0	0	0	0	1	1	0	2	2	0	0
-1	0	0	3	9	1	11	2	13	12	10	8	4	4	6	1	2	0	1	2	10	3	10	1	1	2
0	1	3	15	7	17	11	15	10	7	2	3	12	15	10	1	1	3	2	17	12	10	9	1	2	2
1	1	4	3	2	2	0	2	0	1	1	0	4	1	2	3	6	13	16	1	1	9	1	10	17	1
2	3	15	2	0	1	0	0	2	0	0	0	3	4	16	14	8	3	3	0	1	0	10	1	3	0
3	10	2	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	3	0
4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) L=60일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	1	0	0	1	2	1	1	1	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0
-2	0	0	0	2	3	2	3	7	5	1	8	1	1	0	0	0	0	3	0	0	1	8	1	0	0
-1	0	0	1	11	2	8	11	8	6	11	8	3	8	3	1	0	0	1	4	6	1	8	0	1	0
0	3	1	11	8	15	12	7	5	8	10	6	17	6	13	5	3	1	8	13	15	12	2	2	1	1
1	4	10	10	2	2	1	2	1	1	1	2	7	5	12	3	7	11	1	1	10	0	15	18	1	1
2	12	7	0	0	2	1	0	0	2	0	0	1	2	1	4	17	14	1	4	2	0	0	5	1	1
3	5	6	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	2	0	2	0	0	0	1	3	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(c) L=80일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	
-4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3	0	0	0	1	0	1	1	0	1	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	0	0	0
-2	0	0	2	3	3	1	4	0	6	3	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0
-1	0	1	1	11	10	12	10	13	12	14	8	3	1	2	1	0	0	6	3	10	1	12	0	0	0
0	2	4	13	7	7	9	9	9	5	3	11	13	18	15	1	3	4	7	15	10	15	7	2	3	3
1	3	12	5	2	2	1	0	1	0	1	2	6	1	5	15	3	17	7	4	2	3	1	6	16	1
2	15	6	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	3	1	7	18	1	2	2	0	1	0	9	5	5
3	2	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	2	2	2	0	0	0	0	7	0	0
4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

며, 전 색상의 영역에서 3~6°로 구간에 따라 다르게 나타난다. 표 2.는 각 패치에 따른 색상변화가 인지되는 색상 변화량을 나타내고, 그림 9.는 실험에서 색상 값을 조절하는데 사용되는 미리 생성된 패치를 나타낸다. 표 3.의 결과에서 회색 부분은 28번의 실험을 통해 최대 많이 선택된 결과 값을 가르친다. 하지만 결과에서 보듯이 가장 많이 선택된 색상 조절의 값은 몇 패치의 경우 2단계에 걸쳐 있어 색상이동양으로 사용하기에는 적합하지 않고, 또한 반복적인 실험을 통한 결과를 통해, 색상이동양이 몇 단계에 걸쳐 분포되어 있다는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 일반화를 위하여 색상이동양을 입력 색상에 대해 단일 값을 가져야 한다. 그러므로 본 논문에서는 각 패치에서 실험을 통한 분포의 평균값을 색상이동양으로 사용하였다. 각 밝기에 대한 패치의 색상이동양은 그림 10.에 분포의 평균값으로 나타나 있다. 결과에서 약 0°~35°, 180°~270°, 330°~360° 구간은 색상이동양이 (+)값을 가지고, 나머지 구간에서는 (-)값을 가짐을 확인하였다. 또한 색상이동양은 붉은 색과 푸른색 부분에서 가장 크게 일어났다.

III. 색상이동의 모델링

모든 입력 색상에 대한 색상이동양을 얻기 위해 최종적으로 한 개의 색상이동 함수가 생성되어 색상이동 값이 결정하여야 한다. 그림 10.의 실험 결과에서 보듯이, 각 밝기 단계에 대해 색상이동의 변화는 비슷한 성향을 지닌다. 또한 색상 매칭 실험에서, 두 디스플레이의 휘도 값을 비교해 볼 때, 디스플레이의 절대적인 휘도 값은 각 밝기 단계에 대해 차이가 다르게 나지만, 휘도의 비율은 4배로 유지되는 것을 볼 수 있다. 즉, 색상이동양은 디스플레이의 절대적인 밝기에 의존하는 것이 아니라, 두 자극치의 밝기의 비율에 의존한다는 것을 알 수 있다. 또한 각 밝기의 단계 간의 색상이동양의 차이가 심각하게 크게 나타나지 않음을 알 수 있고, 그 차이는 인간시각이 색상변화를 인지할 수 없는 범위 안에 있음을 확인 할 수 있다. 결과적으로 색상의 차이는 실험 결과의 표준편차의 범위 안으로 생각할 수 있다. 그러므로 대표적인 색상이동양으로써 3단계의 밝기에 대한 색상이동양의 평균이 사용되어, 밝기에 독립적인 색

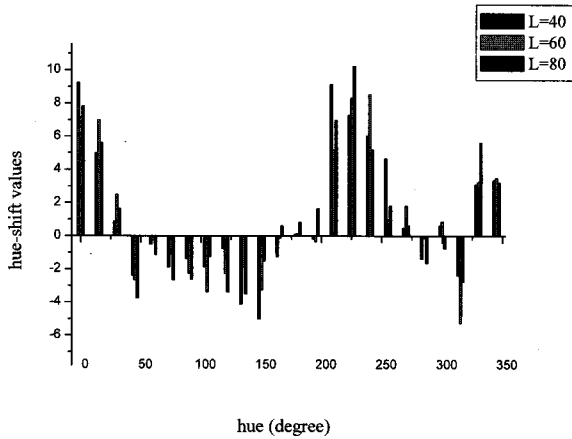


그림 10. 밝기의 단계에 따른 색상이동양
Fig. 10. Quantity of hue shift for each lightness level.

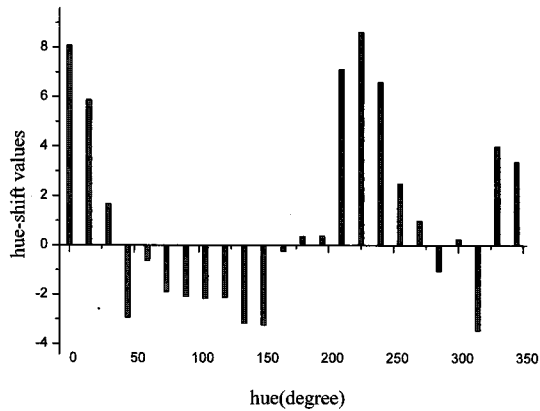


그림 11. 3단계 밝기에 대한 대표적인 색상이동양
Fig. 11. The representative hue-shift values as the average of three lightness levels.

상이동양을 결정할 수 있다. 그림 8은 3단계 밝기의 평균값은 나타내고, 색상이동의 변화량과 경향이 거의 같음을 확인 할 수 있다.

최종적으로 어떤 색상의 입력에도 색상이동양을 구하기 위하여 대표적인 색상이동양을 구간별로 7개의 정현함수로 모델링한다. 아래 수식 1번은 그림 11의 결과를 정현함수를 사용하여 모델링한 색상이동양을 나타내

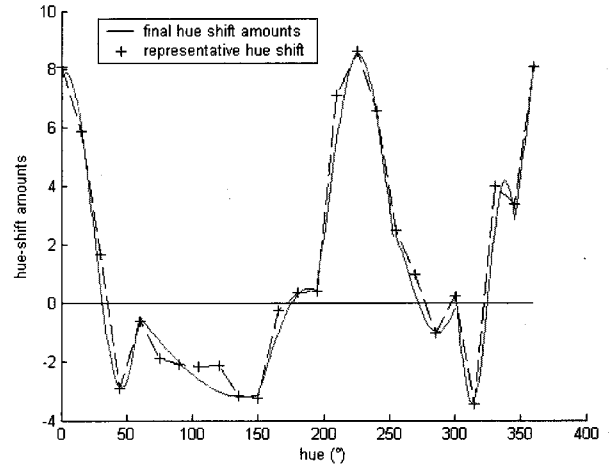


그림 12. 대표적인 색상이동양과 최종적으로 모델링된 색상이동양
Fig. 12. The representative hue-shift values and final hue shift curves.

고, 이는 색상이동모델로 사용이 된다.

그림 12는 대표적인 색상이동양과 모델링된 색상이동모델을 비교하여 나타내고 있다. 그림에서 (+)기호는 대표적인 색상이동양을 나타내며 연결된 선은 (+)기호를 선형적으로 연결한 것이다. 그리고, 색상이동모델은 붉은색 선으로 나타나 있다. 대표적인 색상이동양과 색상이동모델의 색상이동양을 비교했을 때, 차이가 거의 없고, 그 차이는 실험에서 표준편차의 범위 보다 작은 값을 가진다. 그러므로 모델링된 색상이동함수는 최종적인 색상이동양으로 결정이 된다.

IV. 고휘도 디스플레이에서 색상이동모델의 적용

색상이동모델은 고휘도 디스플레이에 입력되는 영상에서 모든 픽셀에 대한 색상이동양을 결정하는 역할로 사용되며, 색상에 대한 수정을 위해 역방향 특성화 과정에서 적용된다. 색 보정의 전체 과정은 그림 13에 나타난다.

첫 번째로 CIEXYZ값이 고휘도 디스플레이에 입력되

$$\Delta h_{ab,shift}(h_{ab}) = \begin{cases} 5.4 \times \sin(h_{ab}/13.5 + 1.3) + 2.5 & 0^\circ \leq h_{ab} \leq 60^\circ \\ 3 \times \sin(h_{ab}/53 + 2.1) - 0.2 & 60^\circ < h_{ab} \leq 150^\circ \\ 3.7 \times \sin(h_{ab}/25 + 0.3) - 3.2 & 150^\circ < h_{ab} \leq 195^\circ \\ 5 \times \sin(h_{ab}/14.5 - 1.48) + 3.5 & 195^\circ < h_{ab} \leq 255^\circ \\ 2 \times \sin(h_{ab}/14 - 3.2) + 1 & 255^\circ < h_{ab} \leq 300^\circ \\ 3.8 \times \sin(h_{ab}/8 - 3) + 0.4 & 300^\circ < h_{ab} \leq 345^\circ \\ 5.4 \times \sin(h_{ab}/13.5 - 1.3) + 7 & 345^\circ < h_{ab} \leq 360^\circ \end{cases} \quad (1)$$

는 영상의 RGB값에서 특성화를 통하여 추정되고, 추정된 CIEXYZ 값은 수식 2를 통하여 CIELAB값으로 변환된다.

$$\begin{aligned}
 L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\
 a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\
 b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \\
 f(w) &= \begin{cases} (w)^{1/3} & w > 0.008856 \\ 7.787(w) + 16/116 & w \leq 0.008856 \end{cases}
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

여기서 X_n, Y_n, Z_n 는 고휘도 디스플레이의 화이트 패치를 측정한 값이다. 그리고 색상의 값을 나타내기 위해 LCh(lightness, chroma, hue)값이 계산되며, 이는 수식 3을 통해 이루어진다.

$$\begin{aligned}
 L^* &= L^* \\
 C_{ab}^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\
 h_{ab} &= \tan^{-1}(b^* / a^*).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

그 후, 수식 1의 색상이동모델에서 계산된 색상 값(h_{ab})으로 색상이동양이 결정되고, 색상 값만이 수식 4와 같이 보정된다.

$$h'_{ab} = h_{ab} + \Delta h_{ab,shift}(h_{ab}).
 \tag{4}$$

수정된 LCh'값으로부터 수정된 CIELAB 값이 수식 5를 통해서 계산된다.

$$\begin{aligned}
 L^* &= L^* \\
 a^*_{shift} &= C^*_{ab} \cos(h_{ab_shift}) \\
 b^*_{shift} &= C^*_{ab} \sin(h_{ab_shift}).
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

마지막으로, 결과영상의 RGB 값은 4면체 보간법을 기반으로 한 3D-LUT 방법을 사용하여 수정된 CIELAB 값에서 추정되어지고, 고휘도 디스플레이의 출력 값으로 사용된다.

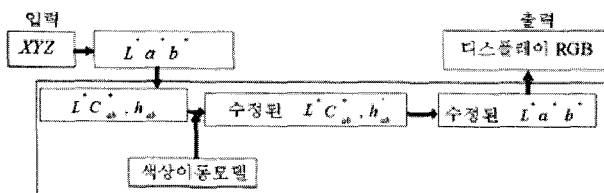


그림 13. 고휘도 디스플레이에서의 색 보정 방법
 Fig. 13. Hue correction method in high luminance display.

V. 실험

제안된 색상이동모델의 효과는 다양한 영상을 사용한 관찰자의 선호도 테스트를 통해 주관적으로 평가된다. 그림 14는 4개의 테스트 영상으로, 하늘, 오렌지, 파란색 옷, 그리고 붉은 색 옷의 영상이다. 그림 15는 그림 14의 영상에 색상이동모델이 적용된 영상을 나타낸다. 그 결과 하늘색이 옅은 보라색으로, 오렌지색은 붉은색이 섞인 오렌지색으로, 푸른색 옷은 보라색으로,

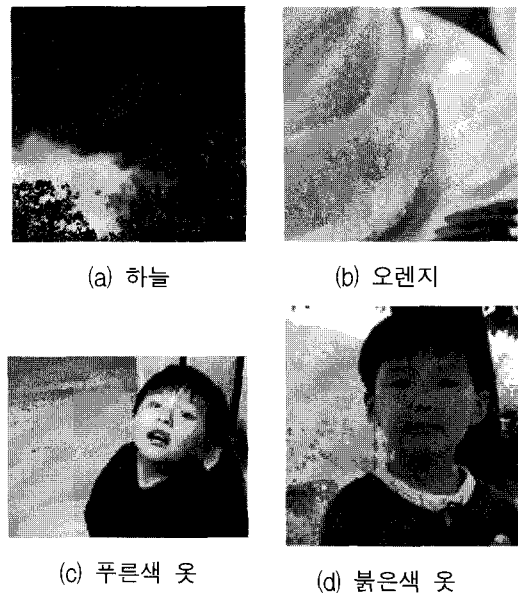


그림 14. 테스트 영상
 Fig. 14. Test images.

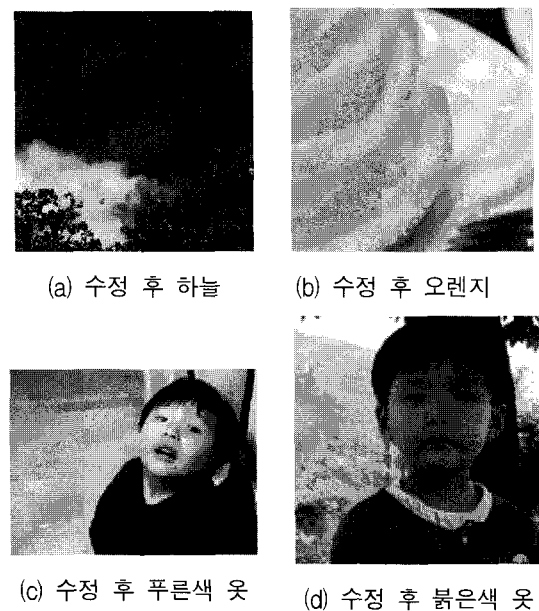


그림 15. 색상이동모델이 적용된 테스트 영상
 Fig. 15. Test images applied the hue shift model.

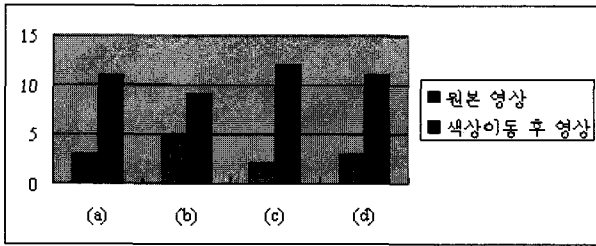


그림 16. 관찰자의 선호도 테스트 결과

Fig. 16. The results of the observer's preference test.

은 색은 주황색으로 변화하는 것을 확인 할 수 있다.

관찰자의 선호도 테스트에서, 테스트 영상은 CRT에 띄워지고, LCD에는 CRT와 동일한 색상을 가지는 영상과 색상이동모델이 적용된 영상의 띄워진다. 이때 CRT 영상의 휘도는 LCD 영상의 휘도의 1/4가 된다. 관찰자는 시각적으로 봤을 때 LCD의 두 개의 영상에서 어느 영상이 CRT의 영상과 색상이 매칭 되는가를 선택한다. 실험은 7명의 관찰자가 2번씩 행하였고, 결과는 그림 16에 나타난다. 그림 17은 결과 값을 z-score로 나타낸 것이다. 시험 결과에서 대부분의 관찰자는 색상이동모델이 적용된 LCD의 영상이 CRT의 영상과 유사하게 보인다고 선택하였다.

VI. 결 론

인간 시각이 고휘도 디스플레이를 시청할 때 휘도의 차이로 인해 띄워진 영상의 색을 다른 색으로 인지하는 되는 색상이동현상이 일어난다. 이 현상으로 인해 관찰자는 일반 휘도의 디스플레이와 고휘도 디스플레이에서 측정 상 색상을 동일하나 휘도가 다른 두 패치를 관찰 할 때, 색상이 다르다고 인지를 하게 된다. 그러므로 두 디스플레이의 색을 인간 시각이 같게 인지하기 위해서 고휘도 디스플레이의 색상보정이 필요하다. 고휘도 디스플레이가 광대역 스펙트럼 분포를 가짐으로, 패치의 색상 값을 나타낼 수 있는 CIELAB에서 밝기와 채도는 고정을 한 뒤, 색상 값에 대한 패치를 생성하여 색상이동현상을 조사하였다. 패치는 먼저 3단계의 밝기에서 밝기와 채도 값을 고정한 채 색상의 전 영역에서 동일한 색상 간격으로 생성되었다. 그리고 인지되는 색상 매칭 실험에서, 생성된 각각의 패치는 두 디스플레이에 띄워지고, 관찰자는 두 디스플레이의 색상이 동일하게 인지 될 때까지 고휘도 디스플레이의 색상 값을 조절하였다. 조절하기 전의 색상 값과 조절한 후의 색상 값의 차로 색상이동양이 결정되었고, 실험은 반복적으로

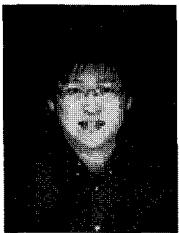
수행되었다. 실험 결과에서 각 패치에 대한 색상이동양은 결과 분포의 평균값을 취하여 각 밝기 단계에서 색상이동양으로 결정되었다. 다음으로 3단계의 밝기에 대한 색상이동양은 실험결과와 경향과 값을 고려하여 색상에 대한 하나의 함수로 모델링 되었으며, 어떤 입력이 들어오더라도 색상이동양을 계산할 수 있게 되었다. 이렇게 형성된 색상이동모델은 고휘도 디스플레이에서 역 과정 특성화에 적용되어 입력 영상의 색상 값을 수정하는 역할로 사용되었고, 관찰자의 선호도 테스트를 통하여 그 효과를 평가하였다. 대부분의 관찰자는 선호도 테스트에서 고휘도 디스플레이의 색상이동모델이 적용된 영상이 일반 휘도 디스플레이의 영상과 시각적으로 같은 색상을 가진다고 판단하였다.

참 고 문 헌

- [1] M. D. Fairchild, *Color Appearance Models second edition*, John Wiley & Sons, 2005.
- [2] Weale, R. A., "When red turns to green," *Nature*, 201, 661-663, 1964.
- [3] Vos, J. J., "Are unique and invariant hues coupled?," *Vision research*, 26, 337-342, 1986.
- [4] R.W.G Hunt, *Measuring Colour Third edition*, Fountain Press, England, 1998.
- [5] Ralph W. Pridmore, "Bezold-Brucke hue-shift as functions of luminance level, luminance ratio, interstimulus interval and adapting white for aperture and object colors," *Vision research*, Turrumurra, Sydney, Australia, vol. 39, pp. 3873-3891, 1999.
- [6] Sheila M. Imhoff, Vichi J. Volbrecht, and Hanice L. Nerger, "A new look at the Bezold-Brucke hue shift in the peripheral retina," *Vision Research*, vol. 44, pp.1-16, March 2004.
- [7] David L. Bimler and Galina V. Paramei, "Bezold-Brucke effect in normal trichromats and protanopes," *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 22, no. 10, October 2005.
- [8] T. C. Hseue, Y. C. Shen, P. C. Chen, W. H. Hsu, and Y. T. Liu, "Cross-media performance evaluation of color models for unequal luminance levels and dim surround," *Color Research and Application*, vol. 23, no. 3, pp. 169-177, June 1998.
- [9] Yang-Ho Cho, Hye-Bong Im, and Yeong-Ho Ha, "Inverse Characterization Method of Alternate Gain-Offset-Gamma Model for Accurate Color Reproduction in Display Device," *Journal of Imaging Science and Technology*,

- Vol. 50, Issue 2, pp. 139-148, Mar./Apr. 2006.
- [10] Roy S. Berns, "Methods for characterizing CRT displays," *Displays*, Vol. 16, Issue 4, pp. 173-182, May 1996.
- [11] Eduardo-Jose Chichilanisky and Brian A. Wandell, "Photoreceptor Sensitivity Changes Explain Color Appearance Shifts Induced by Large Uniform Backgrounds in Dichoptic Matching," *Vision Research*, Vol. 35, No. 2, pp. 239-254, May 1995.
- [12] VESA, Video Electronics Standards Association Display Metrology Committee, Jun. 2001.

저 자 소 개



이 태 형(학생회원)
 2005년 경북대학교 전자전기
 공학부 (공학사)
 2007년 경북대학교 대학원
 전자공학과 (공학석사)
 2007년~현재 경북대학교 대학원
 전자공학과 박사과정
 재학 중

<주관심분야 : 디스플레이 색 재현 및 Color Appearance Model>

권 오 실(학생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 41권 SP편 제 5호 참조

박 태 용(학생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 41권 SP편 제 5호 참조

하 영 호(평생회원)
 대한전자공학회 논문지
 제 38권 SP편 제 3호 참조