

논문 2012-49SP-4-6

# 화이트 채널 추가에 따른 색상이동모델을 이용한 DLP 프로젝터의 색 재현

(Color Reproduction in DLP Projector using Hue Shift Model according  
to Additional White Channel)

박 일 수\*, 하 호 건\*, 하 영 호\*\*

(Il-Su Park, Ho-Gun Ha, and Yeong-Ho Ha)

## 요 약

본 논문은 추가적인 화이트 채널을 사용한 프로젝터와 사용하지 않은 프로젝터간의 매칭 실험을 통하여 색상이동 현상을 모델링하였고, 색상을 수정하는 방법을 제안하였다. 전체 색상 값에 대해 색상이동현상을 정량화하기 위하여, 동일한 밝기와 채도 값을 유지하여 24개의 색상 패치 값을 생성하여 이를 화이트를 추가한 상태와 추가하지 않은 상태에서 투영하였다. 다음으로 각각의 패치에 대해 화이트를 추가 하지 않은 상태와 동일한 색상으로 인지되도록 화이트를 추가한 상태의 색상 값을 변경하였다. 색상 매칭 실험을 통하여 얻은 색상 이동 값을 6개의 구간으로 나누어 4차 방정식을 이용하여 수식화하여 임의의 색상 값에 대한 색상 이동 값을 추정하였고, 색상 값을 수정하는 위하여 사용하였다. 실제로, 입력 RGB 영상은 각각의 픽셀에 대해 CIELAB LCH 색 공간으로 변경하여 각각의 픽셀의 색상 값을 계산하였다. 이 색상 값은 추정된 색상이동량을 이용하여 수정하게 된다. 최종적으로 결과 RGB 영상은 역 과정으로 변환하였다. 제안한 방법을 평가하기 위하여 여러 가지 테스트 영상을 이용하여 매칭 실험을 수행하였고 이를 z-scores를 이용하여 비교하였다.

## Abstract

This paper models the hue shift phenomenon and proposes a hue correction method to give perceptual matching between projector with and without additional white channel. To quantify the hue shift phenomenon for whole hue angle, 24 color patches with the same lightness are first created along equally-spaced hue angle, and these are displayed one by one both displays with different luminance levels. Next, each hue value of the patches appeared on the projector with additional white channel is adjusted by observers until the hue values of patches on both displays appear the same visually. After obtaining the hue shift values from the color matching experiment, these values are piecewise fit into six polynomial functions, which approximately determine shifted hue amounts for an arbitrary hue values of each pixel in projector with additional white channel and are utilized to correct them. Actually, an input RGB image is converted to CIELAB LCH color space to get hue values of each pixel and this hue value is shifted as much as the amount calculated by the functions of hue shift model for correction. Finally, corrected image is inversely converted to an output RGB image. For an evaluation, the matching experiment with several test images and the z-score comparisons were performed.

**Keywords :** Hue shift model, DLP projector, Color correction

## I. 서 론

\* 학생회원, \*\* 정회원, 경북대학교 전자공학부  
(School of Electronics Engineering, Kyungpook  
National University)  
접수일자: 2011년12월23일, 수정완료일: 2012년6월4일

일반적으로 디스플레이 장치는 적색(R), 녹색(G), 청  
색(B)의 3원색을 이용한 색역(Color gamut)에서 색상을

표현한다. 그러나 최근 더 넓은 영역의 색역을 표현하고자 추가적인 채널을 사용하는 디스플레이 장치들이 개발 중이다. 특히 노란색(Y) 혹은 흰색(W) 등과 같은 채널을 추가하여 사용한다.

먼저 RGBY를 사용하는 디스플레이의 경우 실제 영상에서 많이 쓰이는 색임에도 빛의 삼원색과 달라 표현의 문제가 있던 노란색(Y)을 추가하여 색 재현성을 높였다. 노란색의 서브픽셀을 추가함으로써 색상 영역을 넓힐 수 있고 결과적으로 노란색, 청록색의 색상 표현력을 크게 높일 수 있다.

다음으로 높은 밝기를 필요로 하는 디스플레이 장치에서는 빛의 이용 효율을 큰 폭으로 높일 수 있는 화이트 채널을 추가하여 RGBW 채널을 사용한다. 화이트(W) 채널을 추가함으로써 기존의 RGB 채널을 사용하는 디스플레이와 동일한 밝기를 내기 위해서 더 적은 전력을 사용하게 된다. 그러한 이유는 화이트 채널에 투과된 빛이 그대로 통과해 나오게 되기 때문이다. 또한 영상의 대비 또한 향상 시킬 수 있다.

하지만 화이트 채널을 추가한 고휘도 디스플레이를 시청할 경우 인간 시각은 디스플레이에서 표현하는 원본의 색이 아닌 다른 색으로 인지한다. 이는 인간 시각이 디스플레이의 휘도에 영향을 받아 감도 곡선의 변화를 가져오게 되고, 그에 따라 원색에 대해 색상이 이동한 다른 색으로 인지를 하는 것이다. 그러므로 화이트 채널을 추가한 디스플레이와 추가하지 않은 디스플레이 간에 인지되는 색을 시각적으로 같게 하기 위해서는 화이트 채널을 사용한 디스플레이에서의 색상이동현상을 실험하여, 이를 보정하는 알고리즘이 필요하다.

이러한 색상이 다르게 보이는 현상을 Abney 효과(Abney effect)라고 한다<sup>[1]</sup>. Abney 효과는 색자극의 순도가 변하면 색상이 다르게 보이는 현상을 말한다. 예를 들면 노란색 부근 색의 순도를 높이면 색상이 그대로 유지되지 않고 채도의 단계에 따라 색상이 달라지는 것이다. 이같이 파장이 같아도 색의 순도가 변함에 따라 그 색상이 변화하는 것을 Abney 효과라고 한다. Abney는 색상의 밝기를 일정하게 하고, 거기에 백색광을 가해 자극 순도를 변화시키면 그 현상이 보인다고 보고하였다<sup>[2]</sup>. Newhall은 CIE 색도도(CIE chromaticity diagram)에서 채도의 변화에 따른 일정한 색상의 궤적이 일반적으로 직선이 아니라는 것을 제안하였다<sup>[3]</sup>. 또한 Robertson은 Abney 효과는 단색과 백색 자극의 혼

합에 대해 일정하게 인지된 색상의 선을 연결한 것으로 설명하였다<sup>[4]</sup>. 이러한 이론에서 특정 색의 강한 자극에 대해, 인간 시각의 감도 곡선이 순응을 하게 되고, 그로 인해 색을 인지하게 되는 감도 곡선의 비율에 변화를 가져오고, 결과적으로 인간 시각은 원본 자극의 색이 아닌 다른 색으로 원본 자극의 색을 인지하게 된다는 것이다.

기존의 색상 이동 연구 결과는 대부분이 단일과장에 대한 색상이동의 결과로, 추가적인 화이트 채널을 가지는 DLP(Digital Light Processing) 프로젝터에 색상이동현상을 적용하기는 어려움이 있다. 본 논문에서는 색상 비교 실험을 통해 추가적인 화이트 채널을 가지는 DLP 프로젝터에서 일어나는 색상이동현상을 모델링하고, 이 색상이동모델을 기반으로 화이트 추가에 따라 색상이 달라 보이는 현상을 같게 인지되도록 하는 색을 보정하는 방법을 제안하였다. 먼저 색상의 전 영역에서 색상이동의 양을 알아내기 위해, 같은 밝기를 가지는 패치를 등 간격으로 생성하였다. 생성된 패치는 차례로 화이트가 추가한 상태와 추가하지 않은 상태의 프로젝터로 투영하게 되고, 이때 투영된 각각의 패치는 측정학적으로 동일한 색 좌표 값을 가진다. 관찰자는 화이트가 추가된 상태와 추가하지 않은 상태의 색을 관찰 후, 화이트가 추가된 패치가 인간 시각적으로 화이트를 추가하지 않은 상태의 패치와 색이 같아 보이도록 색상 값을 조절한다. 색상 이동의 값은 색상의 값을 조절하기 전의 값과 조절한 후의 값의 차이로 결정하였다. 또한 색상이동의 값은 구간별로 6개의 4차 방정식으로 모델링되고, 입력 색상에 대해 색상이동의 양을 계산하는 함수로 사용된다. 색상이동은 색상 값을 다루기 쉬운 CIELCH 색 공간에서 이루어진다. 제안된 색상이동모델의 유효성을 확인하기 위하여 화이트를 추가한 프로젝터에 테스트 영상을 사용하여 주관적인 색상 매칭 실험을 수행하였고, 결과는 z-score를 사용하여 나타내었다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서는 II장에서는 프로젝터의 색상이동현상을 설명하였다. III장에서는 제안한 방법에 대해서 설명하였고, IV장에서는 실영상을 이용한 실험과 결과 영상을 비교하였고 V장에서는 결론을 내린다.

## II. 프로젝터의 색상이동현상

현재 사용되는 대부분의 디스플레이 장치들은 3색(RGB)을 원색으로 색을 표현한다. 이런 디스플레이 장치들은 인간이 인지 할 수 있는 모든 범위의 색을 표현하지 못한다. 색역(gamut) 한계의 문제점은 협대역의 3원색을 이용하거나, 3원색 이외의 다른 주요색을 추가함으로써 색역을 확장하여 해결 할 수 있다. 이러한 디스플레이 장치로는 RGB-레이저 디스플레이나 멀티프라이머리 디스플레이(multi-primary display; MPD)가 있다. 협대역의 3색을 사용하는 RGB-레이저 디스플레이는 저채도 및 혼합 색상의 표현이 어렵고, 시스템의 복잡도가 높으며 고가이다. 이에 반해 멀티프라이머리 디스플레이의 경우, 3색 이외의 색을 추가하여 색을 표현함으로써 확장된 색역을 가지며 관찰자 등이색성(observer metamerism)을 최소화 할 수 있는 가능성이 있고 구현이 간단하기 때문에 주목받고 있다. 즉, 디스플레이의 색역을 확장하기 위해서 기존의 원색(RGB) 외에 다른 원색을 추가한 디스플레이 장치를 MPD라 한다. 이러한 멀티프라이머리 디스플레이중 추가적인 화이트 채널을 사용하는 디스플레이로 DLP 프로젝터를 사용하여 색상이동현상을 관찰하였다. 화이트를 추가한 상태와 추가하지 않은 상태에서 동일한 패치를 투영 하였을 때 색상은 측정학적으로 동일한 값을 가지나 인각 시각은 두 상태의 패치의 색상이 다르다고 인지를 하게 된다. 이러한 현상은 인간 시각의 감도 곡선의 변화가 생겨 인간은 두 패치의 색이 다르다고 인지를 하게 된다. 그러므로 두 상태에서 인지되는 색을 동일하게 유지하기 위해서는 화이트를 추가된 상태에서 일어나는

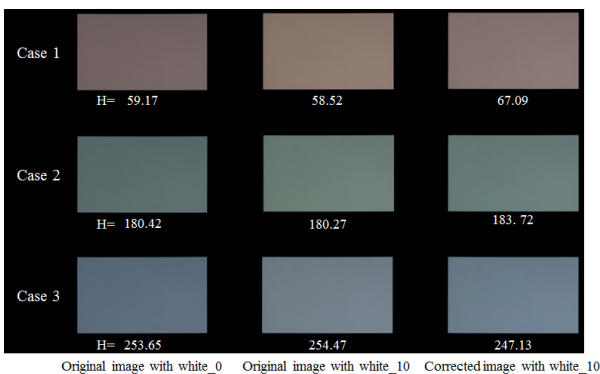


그림 1. 화이트 채널 추가에 따른 색상이동현상  
Fig. 1. Hue shift due to the additional white channel.

인지적인 색상이동의 값을 조사하고, 이를 보정해 주는 알고리즘이 필요하다. 그림 1은 이러한 색상이동현상을 나타내었다. 왼쪽 열의 영상이 화이트를 추가하지 않은 영상이며, 중간 열의 영상에 화이트를 추가하였을 때의 영상이고, 오른쪽 열이 화이트를 추가하였을 때 색상 값을 조절하여 화이트를 추가하지 않은 영상과 색상이 유사한 영상이다. 그리고 각각의 영상아래 영상의 색상 값을 수치적으로 나타내었다. 여기서 White\_0는 화이트를 추가하지 않은 상태를 나타내며, White\_10는 화이트를 추가한 상태를 나타낸다.

## III. 제안한 색상이동현상의 모델링 및 색 보정

화이트 채널이 추가된 DLP 프로젝터의 경우 추가되는 화이트 채널의 영향으로 영상의 채도가 변화하게 된다. 이러한 채도의 변화로 인하여 인간이 인지하는 색상에서 변화가 일어나는 현상이 나타난다. 이러한 현상을 색상이동현상이라 한다. 이러한 색상이동현상을 보정하여 주는 방법을 본 논문에서 제안하고자 한다. 제안한 방법의 전체적인 흐름도를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 보듯이 크게 색상이동현상을 모델링하는 부분과 모델링 한 값을 디스플레이에 적용하는 부분으로 나눌 수 있다. 이 중 색상이동현상을 모델링하기 위하여 모델링에 사용되는 패치를 생성하고, 생성된 패치를 이용하여 색상 매칭 실험을 수행하여 수식으로 모델링을 수행하였다. 이렇게 모델링된 값을 이용하여 디스플레이에 투영될 영상을 보정하였다.

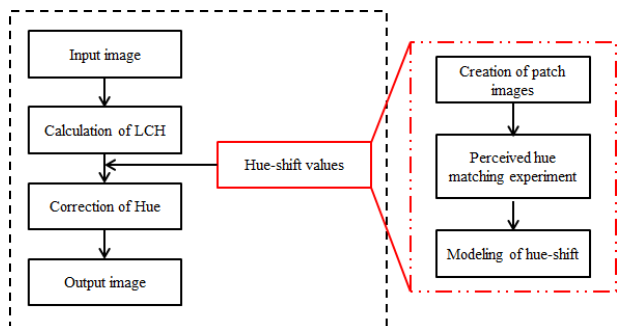


그림 2. 제안한 방법의 전체 흐름도  
Fig. 2. Block diagram of the proposed method.

### 1. 패치의 생성

패치는 실험에서 정량적인 색상이동량을 결정할 수

있는 단위를 가져야 함으로 CIELCH(Lightness Chroma Hue)의 공간에서 생성하였다. 이 공간에서, 휘도(Lightness)와 채도(Chroma) 값은 고정인채 색상(Hue) 값만을 조정할 수 있고, 색상의 이동량을 각도의 단위인 degree(°)로 선정할 수 있어 색상의 이동량을 쉽게 나타낼 수 있다. 수식 (1)과 (2)는 CIELAB로 전환하는 것을 나타내었다.

$$\begin{aligned} L^* &= 116f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16 \\ a^* &= 500\left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right)\right] \\ b^* &= 200\left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right)\right] \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$f(t) = \begin{cases} t^{1/3}, & \text{if } t > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \\ \frac{1}{3}\left(\frac{29}{6}\right)^2 t + \frac{4}{29}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

여기서 L 값은 Lightness를 가리키고, a\*와 b\*값은 대응색(opponent color)를 가리킨다. 또한  $X_n, Y_n$  그리고  $Z_n$ 은 화이트의 CIE XYZ값을 각각 나타낸다. 수식 (3)은 CIELCH로의 전환을 나타내었다.

$$\begin{aligned} C^* &= \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \\ h &= \tan^{-1}(b^*/a^*) \end{aligned} \quad (3)$$

패치는 화이트를 추가 하지 않은 상태와 추가한 상태

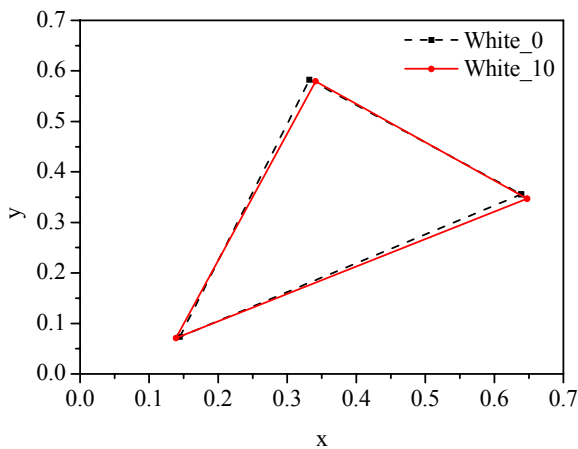


그림 3. 화이트를 추가한 상태와 추가하지 않은 상태의 색역  
Fig. 3. Gamut with and without white channel.

에서의 각각의 상태에서 장치 특성화 과정을 통하여 최종적인 Digital RGB값을 생성하였다. 먼저 두 상태에서 표현할 수 있는 색역이 거의 차이가 없음을 확인하기 위해 측정을 통하여 두 상태의 색역을 비교해 보았다. 그림 3은 각 상태의 RGB primaries를 측정 후 선으로 연결한 것이다. 그림에서 보듯이 색 좌표계에서 화이트를 추가한 상태와 추가하지 않은 상태가 나타낼 수 있는 색의 영역은 평균 오차가 0.01로 실험에 있어 두 상태가 색을 표현하는 차이가 크게 없음을 나타낸다.

다음으로 영상의 어두운 영역에서 밝은 영역의 모두의 색상이동현상을 조사하기 위해 밝기(lightness)를 3

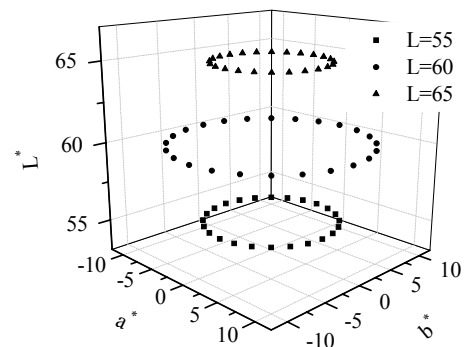


그림 4. LCH 공간에서 생성된 패치  
Fig. 4. Patches in LCH color space.

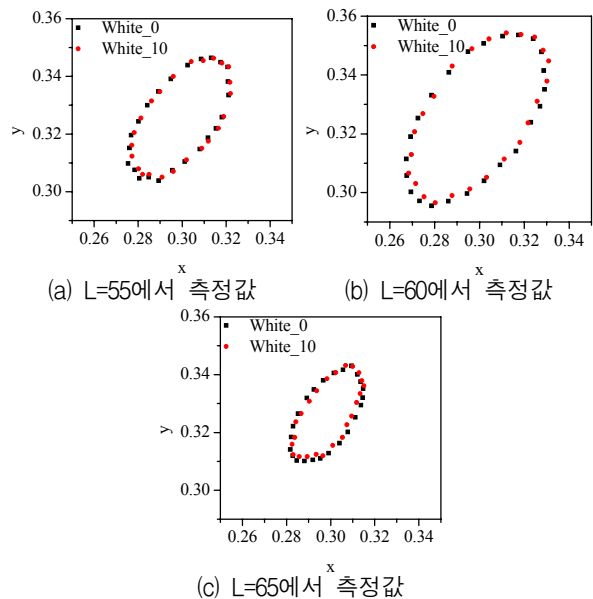


그림 5. 각 밝기 단계에서 White\_0와 White\_10 패치의 측정값  
Fig. 5. The measurements of White\_0 and White\_10 patches at each lightness level.

단계(L=55, 60, 65)로 나눈 후, 각 단계에서 휘도와 채도를 고정시킨 뒤, 일정 간격으로 패치를 생성하였다. 밝기가 너무 낮은 경우와 높은 경우에 관찰자가 색상이 차이를 인지하기 위한 변화량이 너무 적어 색상이동현상을 관찰할 수 없어 위의 3단계에서 관찰하였다. 패치는 15° 간격으로 각 밝기 단계에서 24개씩의 패치를 생성하였다. 그림 4는 CIELAB LCH 색 공간에서 패치를 생성한 결과를 나타낸다. 그리고 실험에 사용된 디스플레이는 LG XGA RD-JT90 모델의 DLP 프로젝터를 사용하였다.

이렇게 생성된 패치는 화이트를 추가하지 않은 상태와 추가한 상태에서 하나씩 투영된다. 그림 5는 생성된 패치를 두 상태에 재현하여 차례로 CS-1000 spectral-radiometer로 측정한 결과이다. 그림에서 보듯이 두 상태에 대한 패치의 색 좌표 값이 거의 차이가 없으므로 측정학적으로 두 패치의 색은 거의 동일함을 확인할 수 있다.

2. 인지적인 색상이동량의 정량화

이전의 단락에서 측정을 통한 방법을 이용하여 색상을 비교 한 결과 두 상태의 색상 값이 유사하게 나타났다. 하지만 사람이 인지하는 색상에는 차이가 나타난다. 이러한 차이를 모델링하기 위하여 인지적인 색상이동량을 실험을 통하여 결정하였다. 실험은 빛이 들어오지 않는 암실에서 수행하였다. 한 대의 DLP 프로젝터와 색재현성이 뛰어난 CRT 모니터를 이용하여 실험을 수행하였다. 먼저 프로젝터와 CRT 모니터를 관찰자의 시각과 평행한 위치에 위치시킨다. 이때 관찰거리는 디스플레이 높이의 4배를 쓰고, 패치의 크기는 디스플레이 높이의 1/5배를 사용하여 정사각형의 패치를 만들게 되면, 이런 조건에서 관찰자가 패치를 보는 시야각은 4°가 된다. CRT 모니터의 배경화면(background)은 검은색 천으로 가려서 디스플레이의 배경색이 실험을 할 때 영

향을 주지 않도록 설정하였다. 그림 6은 실험 환경을 도식화 한 것이다.

실험은 10명의 관찰자를 대상으로 수행하였다. 먼저 암실에서 관찰자는 5분정도 암순응(dark adaptation)을 거친 후 실험을 하였다. 먼저 화이트를 추가하지 않은 상태에서 패치영상을 투영하게 되고 이를 CS-1000을 이용하여 측정하게 된다. 측정된 값과 CRT 모니터의 장치 특성화 과정을 이용하여 동일한 CIE XYZ 값이 측정되도록 기준 영상을 생성하였다. 다음으로 생성된 CRT 모니터의 기준 영상과 화이트를 추가한 상태에서 투영된 영상과 비교하게 된다. 관찰자는 먼저 CRT의 패치를 5초과 관찰 후, 화이트가 추가된 상태의 프로젝터로 투영된 패치를 관찰하여 색이 동일하게 인지되는지를 판단하고, 투영된 패치의 색과 CRT 패치의 색이 동일하게 인지 될 때까지 투영된 패치의 색상(hue) 값을 조절한다. 색상이동량은 조절하기 전의 색상 값과 조절 후의 색상 값의 차이로 결정된다. 그림 7은 CRT 모니터에 기준 영상을 나타내며, 그림 8은 색상 매칭 실험을 도식화 한 것이다.

표 1에 나타난 색상 매칭 실험의 결과는 화이트를 추가한 상태의 색상이동량을 나타낸다. 표에서 제일 윗줄의 숫자는 색상의 값을 나타낸 것으로 단위는 degree(°)이다. 제일 왼쪽 세로축은 관찰자를 나타내는 것이다.

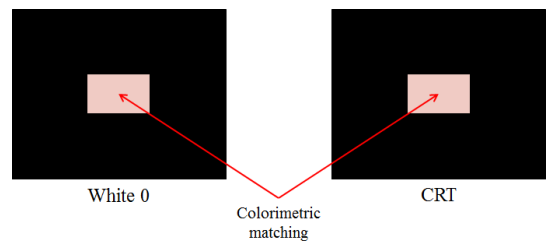


그림 7. 기준 영상 생성  
Fig. 7. Creation of the reference images.

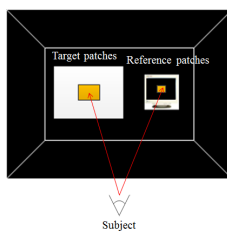


그림 6. 실험 환경  
Fig. 6. Environment of the experiment.

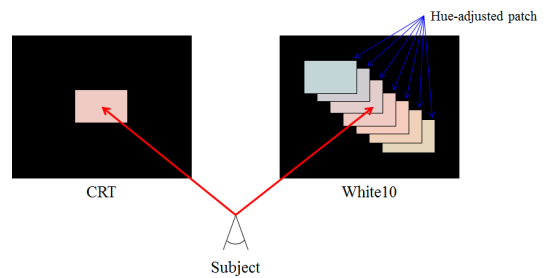


그림 8. 색상 매칭 실험  
Fig. 8. Color matching experiment.

표 1. 색상이동 실험 결과

Table 1. The result of the hue shift.

(a) L=55일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
1	1	8	8	9	8	9	3	5	14	4	9	7
2	2	9	9	8	10	8	5	7	11	6	11	6
3	2	10	12	7	9	8	5	9	8	7	12	9
4	3	11	11	7	13	7	6	9	11	9	12	7
5	3	8	12	8	9	6	6	3	9	9	12	5
6	1	9	8	9	10	9	3	7	12	7	8	6
7	2	8	9	8	10	9	5	7	11	6	11	7
8	2	8	7	9	9	8	5	9	10	5	12	8
9	3	11	8	7	11	7	7	11	11	8	10	7
10	1	8	7	8	10	7	6	3	10	7	12	7
Mean	2	9	9.1	8	9.9	7.8	5.1	7	10.7	6.8	10.9	6.9

hue	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
1	12	8	-3	0	-14	-7	-12	-9	-6	-1	-5	-7
2	13	6	-4	-3	-15	-10	-8	-10	-8	-1	-6	-3
3	14	7	-6	-4	-12	-11	-12	-8	-6	2	-8	0
4	10	3	-2	-2	-11	-12	-11	-13	-8	-3	-4	-6
5	15	5	-4	-2	-16	-8	-9	-8	-10	-3	-7	2
6	14	5	-3	-1	-12	-9	-11	-9	-7	-1	-7	-7
7	12	6	-5	-3	-13	-9	-9	-10	-8	-1	-5	-3
8	13	7	-5	-3	-12	-11	-10	-8	-7	0	-8	1
9	13	4	-3	-2	-11	-10	-11	-13	-8	-2	-5	-4
10	12	7	-4	-2	-14	-10	-9	-8	-9	-2	-7	2
Mean	12.8	5.8	-3.9	-2.2	-13	-9.7	-10.2	-9.6	-7.7	-1.2	-6.2	-2.5

(b) L=60일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
1	-1	5	12	7	7	2	-2	4	3	5	11	0
2	0	9	13	9	10	7	2	10	7	9	7	3
3	2	12	12	12	12	7	3	6	8	7	11	4
4	1	11	15	10	6	6	2	7	8	7	11	4
5	-3	10	13	6	7	2	3	11	8	5	11	0
6	-1	6	11	12	12	7	-2	4	8	5	7	3
7	0	9	13	8	6	6	3	6	6	6	11	3
8	2	11	13	9	9	5	2	7	3	5	13	5
9	1	9	15	10	10	7	2	10	7	9	13	5
10	-3	10	11	7	9	5	3	11	6	6	11	3
Mean	-0.2	9.2	12.8	9	8.8	5.4	1.6	7.6	6.4	6.4	10.6	3

hue	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
1	3	-2	2	-11	-3	-11	-8	-11	-6	-5	-1	-5
2	-4	0	3	-15	-5	-7	-6	-8	-5	-7	2	-7
3	2	-1	2	-11	-5	-12	-6	-11	-6	-5	2	-7
4	2	-3	3	-15	-5	-9	-6	-7	-4	-9	-1	-8
5	3	-3	3	-14	-4	-8	-10	-6	-4	-7	-3	-10
6	-4	0	3	-12	-7	-12	-6	-7	-5	-5	-2	-10
7	0	-4	-2	-11	-3	-8	-10	-6	-4	-7	-1	-8
8	-2	-1	2	-11	-5	-11	-7	-10	-5	-5	-1	-5
9	-2	-2	2	-12	-7	-9	-7	-8	-4	-9	-2	-10
10	0	-4	-2	-14	-4	-7	-8	-10	-5	-7	-3	-10
Mean	-0.2	-2	1.6	-12.6	-4.8	-9.4	-7.4	-8.4	-4.8	-6.6	-1	-8

(c) L=65일 때 색상매칭실험의 결과

hue	0°	15°	30°	45°	60°	75°	90°	105°	120°	135°	150°	165°
1	6	12	9	3	7	5	7	8	6	6	2	5
2	9	9	8	4	5	6	7	9	11	11	1	4
3	10	10	10	4	9	4	9	12	8	10	4	2
4	9	9	10	4	9	4	8	9	11	6	1	3
5	9	9	8	4	7	5	10	8	8	10	-1	3
6	10	7	7	2	6	4	9	12	4	5	-1	2
7	10	10	7	2	5	6	10	8	6	7	2	4
8	6	12	7	5	7	7	5	8	3	7	4	5
9	9	9	9	3	6	4	8	5	3	11	3	4
10	10	7	7	5	7	7	5	5	4	5	3	4
Mean	8.8	9.4	8.2	3.6	6.8	5.2	7.8	8.4	6.4	7.8	1.8	3.6

hue	180°	195°	210°	225°	240°	255°	270°	285°	300°	315°	330°	345°
1	13	-4	-7	0	-4	-4	-3	-13	-11	-13	1	-3
2	14	-6	-5	0	-11	-2	-5	-10	-10	-12	3	-1
3	9	-4	-5	3	-9	-2	-5	-7	-8	-11	2	3
4	9	-5	-6	-1	-7	1	-3	-11	-11	-12	3	3
5	13	1	-6	2	-6	-1	-4	-7	-8	-8	4	0
6	12	-5	-7	3	-4	-4	-2	-7	-9	-13	1	-3
7	12	-4	-7	1	-7	1	-4	-13	-11	-9	4	-1
8	12	-4	-7	2	-9	2	-4	-11	-11	-11	2	0
9	14	-6	-8	-1	-11	2	-4	-10	-10	-9	4	2
10	12	1	-8	1	-6	-1	-2	-7	-9	-8	4	2
Mean	12	-3.6	-6.6	1	-7.4	-0.8	-3.6	-9.6	-9.8	-10.6	2.8	0.2

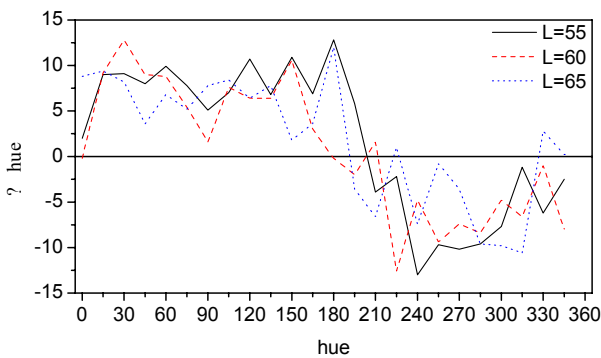


그림 9. 색상 이동 결과

Fig. 9. The result of hue shift.

표에서 숫자 0은 색상이동현상이 인지되지 않는다고 볼 수 있고, +와 -로 색상이동현상의 방향을 표현하였다. 또한 표의 제일 아래선은 10명의 관찰자의 평균값을 나타내었다. 이 평균값이 본 논문에서 사용한 패치에 따

른 최종적인 색상이동량으로 사용하였다.

그림 9는 색상이동 실험의 결과를 평균값을 사용하여 각각의 밝기 단계별로 나타내었고, 단위는 degree를 사용하였다. 가로축은 색상의 범위를 나타낸 것이고, 세로축은 색상의 이동량을 나타내었다.

### 3. 색상이동모델

색상이동현상의 모델링은 앞서 행하여 진 화이트가 추가된 상태의 색상이동현상의 실험 결과를 수식으로 만드는 과정이다. 앞선 실험결과 그래프에서 보듯이 색상이동현상은 구간별로 경향을 가지고 있고, 그 색상이동량 또한 구간별로 다르게 나타난다. 또한 각 밝기(lightness) 단계별로 색상이동의 양이 다르게 나타난다. 이러한 특징을 수식화하기 위해서는 각 밝기를 하나의 수식으로 표현하기에는 어려움이 있다. 그래서 각 밝기

표 2. 다항식의 계수들  
Table 2. Polynomial coefficients.

(a) L=55

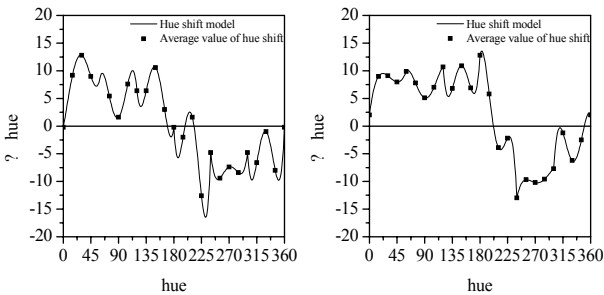
	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)
0~60	-1.2E-06	0.00039	-0.03106	0.84833	2
60~120	-6.6E-06	0.00243	-0.32431	18.4933	-371.7
120~180	2.81E-05	-0.01679	3.74346	-368.435	13514.9
180~240	-3.1E-05	0.02603	-8.09074	1112.76	-57116.2
240~300	-3.9E-06	0.00430	-1.79069	330.285	-22798.2
300~360	-2.3E-05	0.03083	-15.3877	3407.46	-282486

(b) L=60

	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)
0~60	1.04E-05	-0.00101	0.01633	0.574444	-0.2
60~120	-2.2E-05	0.00789	-1.01585	56.4844	-1137.6
120~180	2.65E-05	-0.0159	3.54337	-347.903	12703.6
180~240	5.19E-05	-0.04315	13.4106	-1845.51	94882.4
240~300	1.42E-05	-0.01534	6.22215	-1120	75467.2
300~360	3.9E-05	-0.05131	25.273	-5524.07	452112

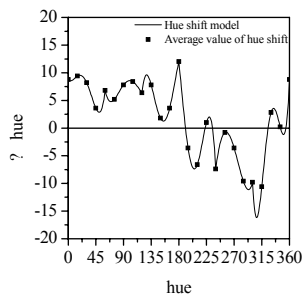
(c) L=65

	P(1)	P(2)	P(3)	P(4)	P(5)
0~60	1.05E-05	-0.00103	0.02563	-0.14889	8.8
60~120	4.61E-06	-0.00183	0.26385	-16.3889	375.2
120~180	-1.3E-05	0.00844	-1.95741	199.227	-7507.2
180~240	-2E-05	0.01630	-4.88433	645.106	-31669
240~300	2.3E-06	-0.00211	0.69637	-95.6178	4402.2
300~360	4.72E-05	-0.06243	30.8956	-6784.4	557773



(a) L=55

(b) L=60



(c) L=65

그림 10. 평균 색상이동량과 색상이동모델  
Fig. 10. Average hue shift value and hue shift model.

에 대해 색상의 값을 60도의 간격으로 4차 다항식을 사용하여 수식을 구현하였다. 수식 (4)는 사용한 4차 다항식을 나타내었다.

$$\Delta h_{shift}(h) = P(1)h^4 + P(2)h^3 + P(3)h^2 + P(4)h + P(5) \quad (4)$$

#### 4 프로젝터에서의 색 보정

색상이동모델은 디스플레이의 장치 특성화 과정에 적용된다. 본 논문에서 사용하는 DLP 프로젝터를 위하여 3D\_LUT 방법의 장치 특성화 과정을 선택하였다.

기본적으로 3D\_LUT 장치 특성화 과정은 입력으로 장치 독립적인 값인 삼자극치(XYZ)가 들어오면, 그 값을 CIELAB 값으로 변환 후, 프로젝터의 RGB값으로 추정하였다. 하지만 색상이동 모델이 적용되기 위해서는 색상(hue)만을 변환 시킬 수 있는 색 공간이 필요하므로, CIELAB 값을 먼저 CIELCH 값으로 변환 후, 휘도(L)와 채도(C)는 고정시킨 후, 색상이동모델을 색상(H) 값에만 적용하여 새로운 LCH값을 생성 후, 다시 CIELAB 값으로 변환하여 새로운 RGB값을 추정하게 된다. 그림 11은 프로젝터의 입력에서 색상이동 모델이 적용되어 화이트가 추가된 상태의 프로젝터의 RGB값을 추정하는 과정을 나타낸 것이다.

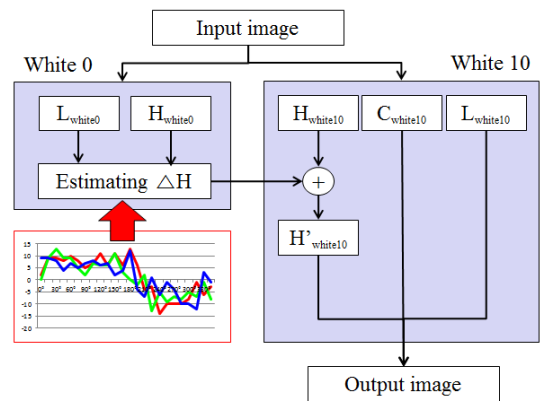


그림 11. 색상 보정 과정  
Fig. 11. Process of the hue correction.

#### IV. 실험 및 고찰

최종적인 실험에서는 생성한 색상이동모델을 실영상에 적용하였다. 실험은 먼저 화이트를 추가 하지 않은

상태에서 기준이 되는 영상을 투영하고, 화이트가 추가된 상태에서는 2개의 영상, 즉 화이트를 추가하지 않은 상태의 영상과 동일한 색을 가지는 영상과 그 영상에 색상이동모델을 적용시킨 영상을 재현하였다. 관찰자는 화이트를 추가한 상태의 2개의 영상 중 어느 영상이 화이트를 추가하지 않은 상태의 영상과 색이 동일한가를 판단하게 하는 것으로 이루어 졌다. 그림 12는 실험에 사용된 영상으로 화이트를 추가하지 않은 상태



그림 12. 실험에 사용된 테스트 영상  
Fig. 12. Test images for experiments.



그림 13. 색상이동모델이 적용된 테스트 영상  
Fig. 13. Test images applied the hue shift model.

표 3. 관찰자의 선호도 테스트 결과

Table 3. The results of the observer's preference test.

images	(a)	(b)	(c)	(d)
Original image	1	2	2	2
Hue-shifted image	9	8	8	8

표 4. Z-score

Table 4. Z-score.

images	(a)	(b)	(c)	(d)
Original image	-1.28	-0.84	-0.84	-1.28
Hue-shifted image	1.28	0.84	0.84	1.28

에 기준이 될 영상으로 사용된다. 총 4장의 영상을 이용하여 실험을 수행하였다.

그림 13은 그림 12의 영상에 색상이동 모델을 적용시킨 후의 영상들이다.

실험에 참여한 관찰자는 10명으로 각 이미지에 대해 색상이동모델을 적용한 영상과 적용하지 않은 영상을 화이트를 추가하지 않은 영상과 비교하는 실험을 수행하여 결과는 내었다. 실험 결과에서 관찰자의 대부분이 색상이동모델이 적용된 영상이 화이트를 추가하지 않은 상태의 영상과 색상이 유사하다고 판단하였다. 표 3은 10명의 관찰자에 대해 주관적인 선호도 테스트 결과를 나타내었다.

색상이동현상은 인지적 현상이므로 측정 장비를 이용하여 측정하는 것은 의미가 없으므로 평가자에 의한 주관적인 평가방법을 수행하였다. 그 결과를 Z-score를 이용하여 평가하였다. Z-score방법은 검사의 결과를 해석 할 때 측정 단위가 다른 것과 환산하여 직접적인 비교하는 확률적인 방법으로 표현한 것이다. 표 4는 Z-score를 나타내었다.

## V. 결 론

본 논문에서는 DLP 프로젝터의 추가적인 화이트 채널 때문에 나타나는 색상이동현상을 모델링하고 보정하는 방법을 제안하였다. 이는 추가적인 화이트 채널을 사용하는 DLP 프로젝터는 인간 시각의 감도곡선의 변화로 인해 인간 시각은 원래의 색이 아닌 색상(Hue)이 변화된 색으로 인지를 하는 현상을 보정하기 위한 것이다. 제안한 방법은 먼저 색상이동의 정량적인 양을 분



석하기 위해 CIELCH 공간을 이용하여 화이트를 추가하지 않은 상태에서 3개의 밝기에 대해 각각 24개의 패치 영상을 생성하였다. 각각의 패치 영상에 대해 화이트를 추가한 상태에서는 색상 값을 1°도 간격으로 변경하여 360개의 비교 영상을 생성하였다. 이렇게 생성된 패치 영상과 비교 영상을 이용하여 인지적으로 가장 유사한 색상을 가지는 영상을 찾는 색상매칭 실험을 수행하여 색상이동의 정량적인 양을 결정하였다. 실험을 통해 색상이동모델을 적용한 영상의 색상이 인지적으로 원본 영상의 색상과 더 유사함을 확인 할 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] Ralph W. Pridmore, "Effect of Purity on Hue (Abney Effect) in Various Conditions," Color Research & Application, vol. 32, no. 1, pp. 25-39, Feb. 2007.
- [2] W. de W. Abney, "On the change in hue of spectrum colours by dilution with white light," Proc. R. Soc. London 183, 120 - 127 (1910).
- [3] S. M. Newhall, "Preliminary report of the O.S.A. subcommittee on the spacing of the Munsell colors," J. Opt. Soc. Am. 30, pp. 617-645, 1940.
- [4] A. R. Robertson, "A new determination of lines of constant hue," AIC Color 69, pp.395-402, 1970.
- [5] D. R. Wyble and M. R. Rosen, "Color management of four-primary digital light processing projectors," Journal of Imaging Science and Technology, vol. 50, no. 1, pp. 17-24, Jan. 2006.
- [6] B. Bastani, B. Funt and R. Ghaffari, "End-User DLP Projector Colour Calibration," Tenth Congress of the International Colour Association AIC Colour, 2005.
- [7] T. C. Hseue, Y. C. Shen, P. C. Chen, W. H. Hsu, and Y. T. Liu, "Cross-media erformance evaluation of color models for unequal luminance levels and dim surround," Color Research and Application, vol. 23, no.3, pp. 169-177. June 1998.
- [8] M. D. Fairchild, Color Appearance Models second edition, John Wiley & Sons, 2005.
- [9] R. L. Heckamane and M. D. Fairchild, "Effect of DLP projector white channel on perceptual gamut," Journal of the SID, vol. 14, no. 9, pp. 755-761, Set. 2006.
- [10] D. M. Purdy, "Spectral hue as a function of intensity," Am. J. Psych, 43, pp. 541-559, 1931.
- [11] M. Ayama, T. Nakatsue, and P. K. Kaiser, "Constant hue loci of unique and binary balanced hues at 10, 100, and 1000 td," J. Opt. Soc. Am. A4, pp. 1136-1144, 1987.

### 저 자 소 개



박 일 수 (학생회원)  
2010년 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
2012년 경북대학교 대학원 전자전기컴퓨터학부 (공학석사)

<주관심분야 : Color management, Color appearance model>

하 호 건 (학생회원)  
대한전자공학회 논문지 제 47권 SP편 제 1호 참조

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