LCD 디스플레이의 하드웨어 캘리브레이션과 소프트웨어 캘리브레이션 품질 비교 연구

A Comparison study on LCD displays' quality evaluation between hardware calibration and software calibration

김 현 서 Kim, Hyun Suh*
이 용 환 Lee, Yong Hwan**

I. 서론
1. 연구의 필요성과 목적
2. 선행 연구
3. 연구의 제한점

II. 본론
1. 실험 연구 설계
2. 실험 결과
3. 통계적 결과 분석

III. 결론

참고문헌

* 제1저자: 중앙대학교 사진학과 박사과정 (hyunsuh.cau@gmail.com)
**교신저자: 중앙대학교 사진학과 교수 (yong0954@gmail.com)

이 논문은 2014년도 중앙대학교 연구장학기금 지원에 의한 것임.

www.kci.go.kr

Abstract

This research aims to study the correctional integrity of LCD digital photo reproduction by analyzing the differences of reproduction quality depending on LCD monitor calibration method. Using monitors that support hardware calibration and calibrating each monitor using hardware and software calibration, this research aims to provide a standard for evaluating the characteristics of each correction method by measuring and analyzing the differences of color image quality between each correction method result.

To ensure objectivity of the research, four monitors from five different manufacturers that support hardware calibration were used. The research took into account the difference in calibration that could be caused by the BLU (backlight unit) type's specific properties for various BLU types reflected differences into the measurement results of the research. Colorimeter and spectrophotometer sensors were used to measure displays, and in order to minimize measurement discrepancies that could be caused by specific sensor properties, various manufacturers of these sensors were used.

In order to measure and evaluate the image quality for each calibration method, White Point and Tone Reproduction were the analysis factors that were compared, and in order to increase the objectivity of the results, all monitors were normalized to the same Luminance level. By measuring and analyzing the resulting image quality, this research aims to evaluate the accuracy and usefulness for each calibration method.

The results of the test showed that for some calibration conditions, it was confirmed that HW calibration did not show a clear difference compared to SW calibration. In the case of White Point and Luminance, HW calibration did not show more correctional effects than SW calibration. For the Tone Reproduction characteristic, when the data was analyzed based on Gamma, it was confirmed that there was a statistical significance in the difference of the results that HW calibration, albeit slightly, showed a better correctional effect than SW calibration.

In the case for Blackpoint, the statistical significance was also confirmed that HW calibration gave a better Blackpoint quality. Therefore, HW calibration shows better correctional effects for both Blackpoint and Tone Reproduction. For fine art pictures that need detailed grayscale, more quality benefit was provided by HW calibration compared to SW calibration. However, for 2D Vector-based design areas such as Illustrator designs and typography, there was little to no benefit to be gained through HW calibration, and in this case, for color, it can be concluded that through just SW calibration it is possible to achieve image and color quality with no statistical difference with that of HW calibration.

Keywords: LCD Monitor, Calibration, Color Management System, Digital Photography

www.kci.go.kr

I. 서론

1. 연구의 필요성과 목적

모니터는 디지털 사진의 컬러를 보여주는 창과 같다. 색상관리 대상 개체들을 모니터를 통해 바로 미리 볼 수 있기 때문에 정확한 컬러시스템을 만들기 위하여 실행하는 모니터 캘리브레이션과 프로파일링은 매우 중요하다. (Fraser et al., 2004, 125) 캘리브레이션은 모니터 디스플레이에 대해 사용자가 원하는 특정 상태를 얻도록 디스플레이의 행동을 변화시키는 것을 의미한다. 행동을 변화시키는 가장 중요한 이유는 디스플레이에 일관성을 확보하기 위함이며, 이러한 일관성의 확보는 디지털 사진의 재현과 편집에 있어 큰 영향을 미친다. LCD (Liquid Crystal Display)디스플레이에서 정확하고 일관된 컬러 이미지 품질을 확보하기 위해서는 주기적으로 캘리브레이션 실행이 필요하다. 최근 출시되는 전문가용 LCD 모니터의 경우 기존의 소프트웨어 캘리브레이션(software calibration, 이하 SW 캘리브레이션)을 보완한 하드웨어 캘리브레이션(hardware calibration, 이하 HW 캘리브레이션) 기능이 제공되며, 이를 통해 보다 정확한 이미지 재현 품질을 얻을 수 있다.

본 연구는 LCD 모니터 캘리브레이션의 두 가지 유형(SW, HW) 에 따른 디지털 사진 재현 품질의 차이를 예측하기 위해 캘리브레이션 결과를 측정하고 비교 분석 하고자 한다. 이를 통해 두 가지 유형에 대해 교정 정확성, 유용성을 연구하는 것을 목표로 한다. 연구실험은 HW 캘리브레이션을 지원하는 LCD 모니터 디스플레이를 선택하였고 하드웨어 및 SW 캘리브레이션을 각각 실시하여 품질을 측정하였다. 연구의 타당성 확보를 위해 실험 대상 모니터는 HW 캘리브레이션 기능을 지원하는 4개 제조사의 5개 제품을 대상으로 하였다. LCD 디스플레이에 사용되는 백라이트(Backlight Unit, BLU) - WCG CCFL, RGB LED, GB-r-LED, White LED 등 다양한 조건에 모두 대응하여 백라이트의 특성에 따른 캘리브레이션의 차이에 대해서도 측정 결과에 반영될 수 있도록 하였다. 측정 도구는 계측기들 중 범용적으로 사용되는 측색계(colorimeter) 및 분광광도계(spectrophotometer)를 센서 제조사별로 교차 사용하여 센서의 고유 특성으로 인해 발생할 수 있는 편차를 최소화하였다.

결과적으로 HW 캘리브레이션의 유용성 및 SW 캘리브레이션의 유효성을 검토하고 디지털 사진의 올바른 재현에 캘리브레이션의 방식 차이가 어떤 영향을 가져오는지를 연구하는 것에 목표를 둔다. 이를 위하여 캘리브레이션 방법별 이미지 품질의 측정 및 평가를 위한 측정 항목(item)으로는 백색점(whitepoint), 흑색점(blackpoint), 톤 재현특성(Tone Reproduction Curve, TRC)을 비교한다. 객관성을 높이기 위해 휘도(luminance)의 경우 모든 모니터에 동일한 값으로 평준화(normalize)한다. 모니터 제조사가 기본 제공하는 HW 캘리브레이션(모니터 LUT 수정) 방법을 사용한 교정 후 상태, 별도의 소프트웨어 기반 캘리브레이션(비디오카드 LUT 수정) 솔루션을 사용한 상태 등 각 캘리브레이션 방법 별로 이미지 품질을 측정하고 결과를 분석하여 그 특성과 신뢰성을 평가할 수 있는 기준을 마련하고자 한다.

www.kci.go.kr

2. 선행 연구

1) 디스플레이 캘리브레이션

장치 교정(device calibation)이란 이미지 장치를 알려진 상태(a known state)로 설정 하는 것을 말한다. 여기서 알려진 상태란 모니터에 대한 특정 기준 백색점 혹은 프린터의 밀도와 출력신호 간의 특정한 관계로 표현할 수 있다. (Fairchild, 2006, 316p) 캘리브레이션이란 장치가 자극에 대해 특정 반응을 나타내도록 조절한다는 의미이다. 주어진 숫자로 출력하면 항상 같은 색상이 나오도록 하는 것이다.

캘리브레이션은 다음 3가지의 목적을 가진다. (Fraser et al., 2004, 121)

- 안정성: 안정적인 프로파일 장치는 같은 자극에 다해 항상 같은 반응을 보인다.
- 최적화: 부드럽게 이어지면서 예측 가능한 톤 그라데이션(tone gradation)의 유지를 위하여 장치의 다이나믹레인지(dynamic range)와 컬러개멋(color gamut)을 최적화 시킨다.
- 시뮬레이션: 캘리브레이션 된 하나의 장치로 다른 장치를 시뮬레이션 할 수 있다.

디스플레이 캘리브레이션은 다음 4가지 항목을 교정한다.(Ashe, 2014, 76)

- 모니터 백색의 휘도: 제곱미터 당 칸델라(cd/m^2)단위로 나타냄
- 모니터 백색의 색상: 캘빈(Kelvin)로 나타냄
- 톤 재현특성: 감마 값으로 나타냄
- 모니터 흑색의 휘도: 제곱미터 당 칸델라(cd/m^2)단위로 나타냄

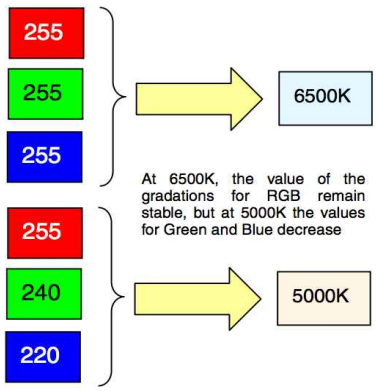
여기서 캘리브레이션과 프로파일링은 표면적으로 그 수행단계가 매우 비슷해 보이기 때문에 종종 혼동하는 경우가 있다. 캘리브레이션은 장치를 반복적으로 최적화 수행이 가능한 상태로 가져오는 것이다(Ashe, 2014, 34p). 프로파일링은 장치(모니터)의 반응을 기록하여 프로파일에 부호화 하고 끝난다. 캘리브레이션은 자극과 반응을 이용하여 장치의 반응을 실제로 바꾼다. (Fraser et al., 2004, 115p) 디스플레이의 캘리브레이션은 모니터 하드웨어에 내장된 스케일러(AD보드)의 LUT 를 직접 수정하여 행동을 변화시키는 방식과 그래픽카드의 LUT를 수정하여 최종적으로 모니터에서 재현되는 이미지의 속성을 변화시키는 방식으로 나뉜다. (Eizo, 2007, 1)

2) SW 캘리브레이션과 HW 캘리브레이션

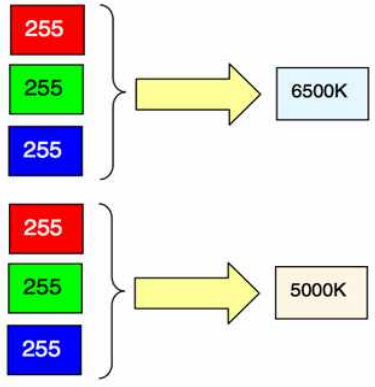
HW 캘리브레이션 기능을 제공하는 디스플레이로 잘 알려진Eizo 사의 Whitepaper 03-003 Rev. A 에 따르면, SW 캘리브레이션은 백색점, 그라데이션, 밝기 등의 교정에 있어 그래픽카드의 출력치를 하향 조정하는 방식을 사용하기 때문에 출력 시 일부 채널의 계조 손실이 발생한다고 한다. 예를 들어 RGB 의 값이 255,255,255 인 상황에서 백색의 색 온도를 낮추고자 하는 경우 <그림1>과 같이

www.kci.go.kr

그래픽카드의 Green과 Blue 컬러 채널을 낮추는 방식으로 교정을 진행하며, 감마나 밝기의 조정에 있어서도 동일한 방식으로 교정을 진행한다. 이에 따라 전체 그레이 스케일을 띄우는 경우 모든 RGB 컬러는 8비트 이하로 모니터에 전송되어 톤 뭉침(banding) 현상 등을 발견할 수 있는 것이다.



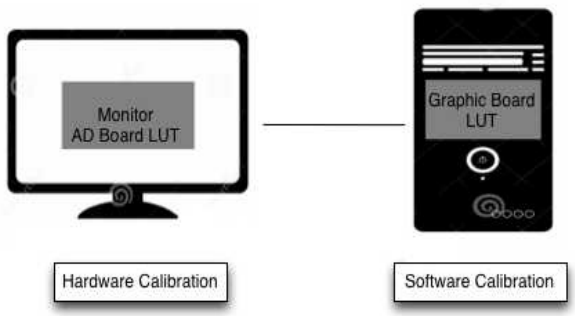
<그림1> SW 캘리브레이션시 출력치의 손실
출처: Eizo Whitepaper 03-003 Rev. A



<그림2> HW 캘리브레이션시 출력치의 비손실

이에 반해 HW 캘리브레이션은 백색점, 그라데이션, 밝기 등의 재현에 있어서 그래픽카드의 출력치 손실 대신 모니터 하드웨어 내부의 출력치 수정을 통해 목표 컬러의 재현을 가능하게 한다. 예를 들어 RGB 값이 255,255,255 인 상황에서 백색의 색온도를 낮추고자 하는 경우 <그림2>와 같이 모니터 내부의 RGB 조정을 통해 Red 와 Green 은 255에 그대로 두고 Blue 의 출력을 높이는 형태로 교정을 진행한다. 이와 동일하게 감마나 밝기의 조정 시 0에서 255까지의 그라데이션에서 계조 손실이 발생하지 않는데 그 이유는 모니터 내부에 있는 더 넓은 크기의 참조 테이블(LUT, Look up table)을 사용하여 256 단계의 그레이스케일 재현에 톤뭉침(banding) 또는 포스터리제이션(posterization) 현상이 발생하지 않는다. 이에 모든 RGB 컬러에 대해 온전히 8비트의 데이터로 모니터에 전송하고 재현할 수 있으며, 컬러와 밝기, 톤 재현 조정 등은 모니터 내부에서 이루어진다.

HW 캘리브레이션을 통해 얻는 이익으로는 백색점, 밝기 등을 교정하더라도 그라데이션과 컬러를 재현하는데 있어 계조 손실이 적은 점이며, 이것이 그래픽카드의 LUT 수정을 기반으로 하는 소프트웨어 기반 캘리브레이션과 두드러지게 차이 나는 부분이라 할 수 있다. 이와 같은 이유로 사진, 영상, 그래픽, 컬러 등의 전문적인 분야를 위해 공급되는 전문가용 모니터는 대부분 HW 캘리브레이션 기능을 내장하는 추세이다.



<그림 3> HW캘리브레이션과 SW캘리브레이션

www.kci.go.kr

3. 연구의 제한점

본 연구는 HW 캘리브레이션 기능을 지원하는 모니터를 한정된 수의 표본만으로 측정 및 분석을 진행하였기 때문에 표본 오류의 가능성이 존재한다. 또한 표본 모니터가 특징적으로 가지고 있는 이미지 재현 특성에 따라 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션시의 품질에 영향을 미칠 수 있어 측정값의 통계적 검정을 통해 이를 회피하고자 하였다. 측정기기의 오차를 최소화하기 위해 측색계(colorimeter) 및 분광광도계(spectrophotometer)등 다양한 계측장치를 복수로 사용하여 데이터의 신뢰성을 확보하기 위해 노력했으나 센서 자체의 정확도(accuracy), 지속성(repeatability), 기기간 편차(inter-instrument deviation)가 결과값에 영향을 미칠 가능성은 여전히 존재한다.

HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 차이를 보다 심도 있게 연구하기 위해서는 본 연구에서 접근한 IRE 10단계 접근 방법이 아닌 256 단계 이상의 접근을 통해 인터폴레이션(interpolation), 밴딩(banding) 현상의 유무를 측정할 수 있어야 한다고 볼 수 있다. 이러한 한계점은 역설적으로는 극도로 정밀한 톤 재현이 필요한 경우가 아니라면 SW 캘리브레이션이 아닌 HW 캘리브레이션으로 얻을 수 있는 이득이 크지 않음을 역설한다고 할 수 있다.

모니터의 전반적인 성능을 평가하는데 있어서는 백색점, 톤재현특성, 밝기 뿐만 아니라 화면 균일도(screen uniformity) 역시 고려되어야 하나, 본 연구에서는 캘리브레이션의 성능에 한정하여 실험 및 분석을 진행하였다.

II. 본론

본 연구는 HW 캘리브레이션 기능이 SW 캘리브레이션에 비해 얼마나 모니터를 통한 디지털 사진의 일관성 있는 컬러 재현에 유리하고, 이미지의 표시 품질의 어떤 속성에서 차이를 보이는지를 상대 비교 및 분석하는 연구이다. 캘리브레이션을 통해 교정되는 백색점, 흑색점, 톤 재현특성, 백색 휘도의 4대 속성을 기준으로 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 품질 차이를 분석하고자 한다.

1. 실험 연구 설계

HW 캘리브레이션을 지원하는 컬러 LCD 모니터를 제조사 및 모델 별로 5대를 표본으로 설정하여 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션을 병행 실시하고 각 결과의 차이에 대한 평가를 진행하였다. 성능평가에는 측색계(colorimeter) 및 분광광도계(spectrophotometer)등 복수의 측정도구를 교차 사용하여 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션을 각각 진행하였으며, 캘리브레이션 결과 측정 시 동일한 복수의 측정도구를 교차 사용하여 측정도구 고유의 편차로 인한 데이터의 신뢰성 문제를 최소화 하고자 노력하였다.

1) 캘리브레이션 성능 비교 평가 항목

HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 성능 비교 평가를 위한 속성으로 캘리

www.kci.go.kr

브레이션의 4대 요소인 백색점(whitepoint), 흑색점(blackpoint), 톤재현특성(tone reproduction curve), 백색의 휘도(white luminance)를 기준으로 평가를 진행하였으며, 준용한 기준은 <표1>과 같다.

평가 항목	목표치	준용 기준
백색점 (whitepoint)	6500kelvin	sRGB(Stokes et al., 1996, 1p) AdobeRGB color space (Adobe Systems Incorporated, 2005, 8p) ITU-R Recommendation BT.709 (ITU-R, 2002, 2p)
흑색점 (blackpoint)	소프트웨어 제안치	LCD 모니터의 물리적인 특성상 기준 흑색점 값은 설정하지 않고 캘리브레이션 소프트웨어가 제안하는 수치로 캘리브레이션 진행 (Fraser et al. 2004, 140p)
톤 재현특성 (tone reproduction curve)	Gamma 2.2	AdobeRGB color space(Adobe Systems Incorporated, 2005, 10p) ITU-R Recommendation BT.709 (ITU-R, 2002, 3p)
백색 휘도 (white luminance)	120cd/sqm	컬러 매니지먼트 관련 솔루션들이 LCD 모니터와 사진 프린트물의 이미지 매칭을 위해 공통적으로 제안하는 휘도

<표1> 성능 비교 평가 항목

2) 디스플레이 표본 및 HW 캘리브레이션 소프트웨어

HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 비교를 위한 표본으로는 <표2>의 HW 캘리브레이션을 지원하는 모니터 5대를 선정하였다.

측정표본	제조사	모델명	백라이트 특성	색재현영역	HW 캘리브레이션 소프트웨어	소프트웨어 버전
1	Eizo	CX271	GB-r-LED	Wide Color Gamut	Color Navigator NX	1.1.1
2	Eizo	CG243w	WCG CCFL	Wide Color Gamut	Color Navigator	6.4.7.8
3	LG	27EA83	GB-r-LED	Wide Color Gamut	True Color Pro	3.1.0
4	LG	29EA93	White LED	sRGB	True Color Finder	2.7.8
5	삼성	S27B970	White LED	sRGB	Natural Color Expert	4.0.2.10

<표2> 모니터 디스플레이 표본

HW 캘리브레이션 모니터의 설정은 가급적 기본 설정에서 변화 없이 통제된 상태에서 진행하였으며, 색역은 기본 원시 색역(native color gamut)으로 지정하였다.

3) 계측 도구 및 SW 캘리브레이션 소프트웨어

측정도구	제조사	모델명	소프트웨어	소프트웨어 버전
1	Datacolor	Spyder4Elite	Spyder4Elite	4.5.6
2	X-Rite	i1Display PRO	i1Profiler	1.5.6
3	X-Rite	i1Pro 2	i1Profiler	1.5.6

<표3> 측정 도구 및 SW 캘리브레이션 소프트웨어

www.kci.go.kr

최근의 측색계(colorimeter)는 모니터의 색역에 따른 보상(compensation)을 실시하고 있으므로, 각 모니터에 맞는 색역 설정을 지정하여 캘리브레이션을 진행하였다. 캘리브레이션의 품질은 캘리브레이션 시 소프트웨어의 설정에 따라 많은 영향을 받는다. 측정 데이터에 객관성을 기하기 위해 기본적으로 모든 캘리브레이션 소프트웨어의 설정은 기본값을 유지하는 방향으로 통제된 상황에서 측정을 진행하였으나, 각 캘리브레이션 소프트웨어의 설정을 환경에 맞게 조절하는 경우 더 유리한 결과 데이터를 얻을 수 있을 것이다. 하지만 각 소프트웨어들이 가지고 있는 고유한 캘리브레이션 알고리즘에 따른 편향성이 존재할 수 있어 복수의 장치를 사용하여 산술 평균하는 방법을 채택했다.

4) 계측 소프트웨어

캘리브레이션과 결과 검증을 위한 계측 소프트웨어로는 범용적으로 사용되는 오픈소스 소프트웨어로 FSF, GNU GPL 라이선스를 따르는 HCFR Colorimeter 의 3.1.6 버전을 사용하였다. 계측 소프트웨어의 기준 설정은 기본적으로 ITU Recommendation BT.709 를 기준으로 하였다. 측색계(colorimeter)를 이용한 계측 시에는 측정 모니터의 색역 보상(compensation) 기능을 사용하였다.

5) 캘리브레이션 및 측정 환경

일부 캘리브레이션 소프트웨어들이 특정 운영체제만을 지원하는 문제와 함께, 측정 PC 환경의 변동성을 최소화하기 위해 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션은 공통적으로 MS 윈도우 7 및 8 운영체제를 기반으로 진행하였다. 모니터 디스플레이는 사용시간에 따라 지속적으로 컬러가 변하고, 특히 전원을 껐다가 다시 켜는 경우 컬러 및 이미지 재현 특성의 변화가 심하기 때문에(김환, 2014, 블로그) 모니터 전원공급의 차이에 따른 컬러 특성 변동성을 최소화하기 위해 전원을 지속적으로 공급하고, 전원절약설정, 화면보호기, 모니터 하드웨어의 자체적인 에코절전기능 등 부가적으로 모니터의 컬러특성에 영향을 미칠 수 있는 속성들을 적극적으로 통제하였다.(ICC, 2004,7) 또한 48시간 내에 모든 계측을 완료하여 모니터의 사용시간에 따라 변하는 컬러 및 밝기 출력의 변동성을 최소화하였다. , 측정 당시의 외부 조명 환경이 계측 값에 영향을 미칠 수 있기 때문에 낮은 밝기의 일정한 조명환경에서 실험을 진행하였다.

6) 실험 모형 설계

(1) HW 캘리브레이션 시행

HW 캘리브레이션 모니터에서 각각 제공하는 HW 캘리브레이션 전용 소프트웨어인 Eizo의 Color Navigator, 삼성의 Natural Color Expert, LG의 True Color Finder 등을 사용하여 HW 캘리브레이션을 시행한다. 각 모니터 별로 복수의 센서를 교차 사용하여 센서간 편차(inter-instrument deviation)로 인한 오류를 줄인다.

(2) SW 캘리브레이션 시행

그래픽카드의 LUT 를 수정하여 모니터 캘리브레이션의 효과를 얻는 SW 캘리브레이션 솔루션으로 Datacolor 사의 Spyder4, X-Rtie사의 i1Pro 2 및 i1Display

www.kci.go.kr

PRO 에서 제공하는 번들 소프트웨어를 사용하여 SW 캘리브레이션을 시행한다. HW 캘리브레이션과 마찬가지로 각 모니터에 대해 복수의 센서를 교차 사용한다.



<그림 4> 실험 과정

(3) 캘리브레이션 후 결과 측정

HCFR Colorimeter 소프트웨어를 사용하여 HW/SW 캘리브레이션 이후 결과에 대해 10% IRE 단위로 재현 값을 측정한다. 결과 측정 시 복수의 센서를 교차 사용한다.

(4) 측정 데이터 코딩

각 모니터, 각 센서, 캘리브레이션 방법 별로 시행한 측정 결과를 바탕으로 측색 데이터를 코딩하여 비교 평가를 진행할 값을 추출한다.

- 백색점: xyY 값을 Lch로 변환 후 Delta E 계산
- 흑색점: xyY 값을 Lch로 변환 후 Delta E 계산
- 톤재현 특성:
  1.측정된 각 IRE 영역별 xyY 값을 LcH로 변환 후 DeltaE를 각각 도출하여 산술평균 Delta E 확보
  2.측정된 감마 값을 직접 비교

$$\Delta E^*_{94} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L^*}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C^*_{ab}}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H^*_{ab}}{k_H S_H}\right)^2}$$

where:

$$\Delta L^* = L^*_1 - L^*_2$$

$$C^*_1 = \sqrt{a^{*2}_1 + b^{*2}_1}$$

$$C^*_2 = \sqrt{a^{*2}_2 + b^{*2}_2}$$

$$\Delta C^*_{ab} = C^*_1 - C^*_2$$

$$\Delta H^*_{ab} = \sqrt{\Delta E^{*2}_{ab} - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}_{ab}} = \sqrt{\Delta a^{*2} + \Delta b^{*2} - \Delta C^{*2}_{ab}}$$

$$\Delta a^* = a^*_1 - a^*_2$$

$$\Delta b^* = b^*_1 - b^*_2$$

$$S_L = 1$$

www.kci.go.kr

$$S_C = 1 + K_1 C_1^*$$
$$S_H = 1 + K_2 C_1^*$$

- 백색의 휘도: 100% IRE 영역에서 계측된 xyY 값 중 Y 값을 기준으로 산술평균

측색된 데이터를 기반으로 더 높은 품질을 보이는 결과를 찾기 위해 Delta E 색차(color difference)를 구하였다. 사용한 색차식으로는 기존의 CIE76 Delta E를 개선한, L*a*b* 를 통해 계산된 chroma 값과 hue 값을 기반으로 L*C*h* 색 공간에서 색차를 구하는 Delta E 1994 (CIE94) 식을 사용하였다. 이렇게 확보된 각 모니터별 및 센서별 Delta E 를 기반으로 백색점, 흑색점, 톤 재현특성의 품질을 비교하며, Delta E 수치가 0에 가까울수록 보다 높은 품질, 보다 정확한 컬러를 재현함을 의미한다.

(5) 데이터 확률 분석 및 검증

각 모니터 표본, 각 센서 측정도구, 각 캘리브레이션 유형 별 변수로 코딩 완료한 데이터를 기반으로 T분포를 사용하여 유의확률을 구한다. 데이터의 타당성 분석, 신뢰도 분석, T-Test 분석을 통해 통계적 유의성을 판단한다.

2. 실험 결과

각각의 방식으로 캘리브레이션 후 결과를 각 센서 별로 측정하고 1차 데이터 코딩을 진행한 후, 센서 별로 진행한 캘리브레이션을 산술 평균하여 도출한 2차 코딩 데이터를 기초로 변수 집단간 평균 비교 검정을 실시하였다. 각 방법에 대해 T-Test 검정을 실시한 결과는 아래 <표4>와 같다. 평균 비교 검정은 SPSS 18 통계 패키지를 이용하여 진행하였다.

연구실험의 대상이 되는 모니터 표본의 수가 부족한 상황에서 실험 결과치의 타당성과 신뢰성을 확보하고, 측정된 수치에 대한 연구 절차적 검정을 실시하기 위해 통계적 분석을 진행하였다. HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 두 집단 간 계측결과 차이는 t 값의 유의확률 수치로 판단할 수 있으며, 이에 따라 t-test 를 진행하여 집단 간 차이에 대한 검정을 실시하였다.

T-Test 검정	평균		표준편차		t값	p값
	HW 캘리브레이션	SW 캘리브레이션	HW 캘리브레이션	SW 캘리브레이션		
백색점 (Whitepoint)	5.44615	3.96667	4.076431	3.454085	1.729	0.088
흑색점 (Blackpoint)	0.65385	1.09744	0.535501	0.867994	-2.716	0.008
톤재현특성1 (Tone Reproduction Curve)	3.313872	2.60615	2.158238	2.037172	1.121	0.266
톤재현특성2 (Tone Reproduction Curve)	2.19974	2.17821	0.30130	0.27708	3.286	0.002
백색 휘도 (White Luminance)	118.91262	119.86010	3.406003	5.329465	-0.936	0.352

*p<0.05

<표4. T-Test 평균 비교 검정>

www.kci.go.kr

백색점은 t값이 1.729, 백색휘도는 t값이 -0.936 으로 캘리브레이션의 방법에 따른 결과의 차이가 유의미하게 나타나지 않는 것으로 확인되었다. 흑색점에서는 t값이 -2.716 의 수치를 보여 통계적 유의수준 하에서 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션간 차이가 있으며, HW 캘리브레이션이 약간 우세한 결과를 보여주는 것으로 나타났다. 톤 재현특성의 경우 IRE DeltaE 의 산술평균을 기초로 한 톤 재현특성은 t값이 1.121로 나타나 T-Test 검정으로는 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션간 차이가 없는 것으로 나타나나, 산술평균 감마 값을 기초로 한 톤 재현특성 비교에서는 t값이 3.286 으로 상당한 유의성을 보여주었다. HW 캘리브레이션이 평균 2.199 감마, SW 캘리브레이션이 평균 2.178 감마를 보여 HW 캘리브레이션이 소프트웨어 캘리브레이션 목표 값인 감마 2.2에 보다 더 가까운, 더 정확한 캘리브레이션이 가능함을 확인할 수 있었다.

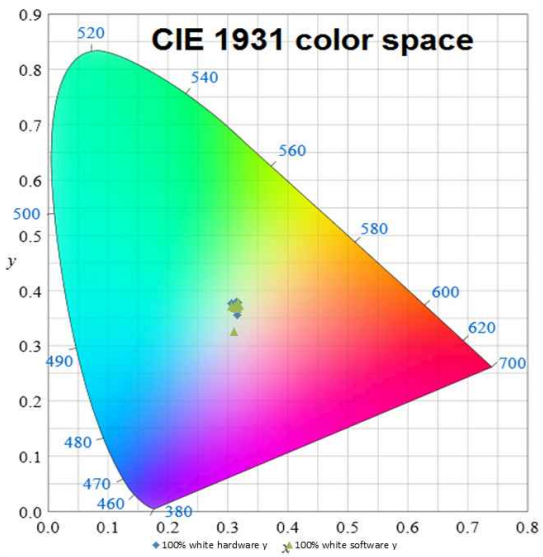
3. 통계적 결과 분석

디지털 이미지의 재현에 있어 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 품질 차이를 비교하기 위해 다음과 같이 캘리브레이션의 속성 별로 평가를 진행하였다.

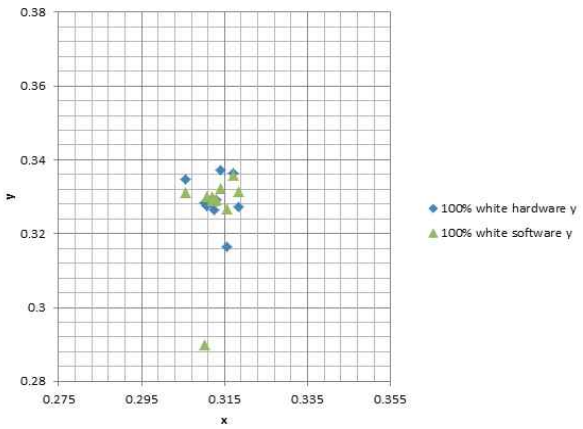
1) 백색점 (whitepoint)

Avg. Delta E	1번 표본 모니터	2번 표본 모니터	3번 표본 모니터	4번 표본 모니터	5번 표본 모니터
HW 캘리브레이션	2.6	2.3	2.8	8.3	0.7
SW 캘리브레이션	3.0	2.0	2.9	6.7	0.3

<표5> 캘리브레이션 방법 별 백색점의 평균 Delta E



<그림 5> 백색점(whitepoint) CIE1931 표시



<그림6> 좌측 그래프 확대

T-Test 검증을 통해서도 확인된 바 있으나 캘리브레이션의 방법에 차이가 백색점에 유의미한 품질의 향상을 가져오지는 못하는 것으로 확인되었다. <표5>에서 보다시피 모니터에 따라서는 HW 캘리브레이션보다 SW 캘리브레이션이 더욱 낮은 Delta E 를 보여주는 경우(2,5번 샘플)가 있었으며, 이에 HW 캘리브레이션이 SW

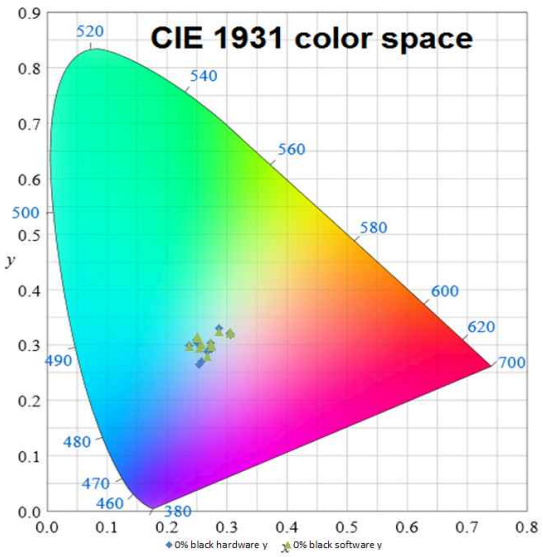
www.kci.go.kr

캘리브레이션보다 더 나은 성능을 보여주는지는 않는 것으로 판단된다.

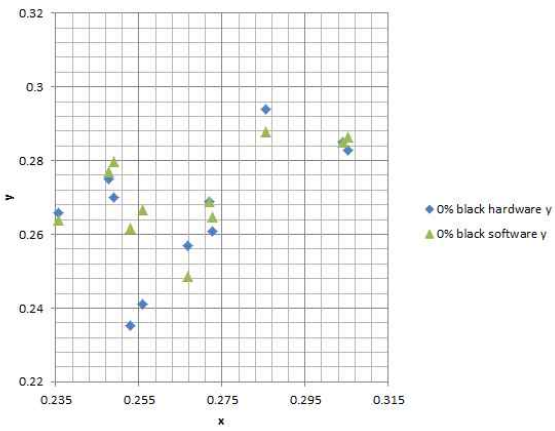
2) 흑색점 (blackpoint)

Avg. Delta E	1번 표본 모니터	2번 표본 모니터	3번 표본 모니터	4번 표본 모니터	5번 표본 모니터
HW 캘리브레이션	0.4	0.2	0.3	2.2	0.9
SW 캘리브레이션	1.0	0.6	1.1	2.4	1.1

<표6> 캘리브레이션 방법 별 흑색점의 평균 Delta E



<그림 7> 흑색점(blackpoint) CIE1931 표시



<그림8> 좌측 그래프 확대

캘리브레이션 방법별 유의미한 차이가 T-Test 를 통해 발견된 흑색점(blackpoint)의 경우 <표6>에서와 같이 전반적으로 HW 캘리브레이션 보다 낮은 평균 Delta E 수치를 보여주어 통계적으로 HW 캘리브레이션이 SW 캘리브레이션보다 나은 품질의 흑색점을 확보한다고 평가할 수 있다. 다만, LCD 와 같은 수광형 디스플레이(Non-Emmisive Type)에서 재현되는 흑색점의 경우 컬러의 차이(Delta E)가 큰 의미가 없을 수 있음을 유의할 필요가 있다.

3) 톤 재현 특성 (Tone Reproduction Curve)

Combined Delta E	1번 표본 모니터		2번 표본 모니터		3번 표본 모니터		4번 표본 모니터		5번 표본 모니터	
	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max	Avg	Max
HW 캘리브레이션	1.44	2.65	1.26	5.09	1.73	3.17	4.96	8.33	1.52	3.08
SW 캘리브레이션	2.03	3.39	1.33	2.51	1.90	3.31	4.67	7.00	0.90	2.07

<표7. 캘리브레이션 방법 별 톤재현특성의 평균 및 최대 Delta E>

IRE 10% 단위 밝기 별 Delta E 를 기초로 한 산술평균을 기준으로 분석한 경우, <표7>에서와 같이 표본 모니터에 따라 SW 캘리브레이션이 HW 캘리브레이션에 비해 더욱 낮은 Delta E 를 보여주는 사례(4,5번)가 있었으며, 통계적으로 HW

www.kci.go.kr

캘리브레이션과 SW 캘리브레이션의 톤 재현특성 교정에 대한 품질의 차이는 미미한 것으로 확인되었다.

Avg. Gamma	1번 표본 모니터	2번 표본 모니터	3번 표본 모니터	4번 표본 모니터	5번 표본 모니터
HW 캘리브레이션	2.2000	2.1867	2.2267	2.1700	2.1667
SW 캘리브레이션	2.1883	2.1700	2.1733	2.1500	2.1767

<표8> 캘리브레이션 방법 별 톤 재현특성의 산술평균 감마

하지만 상기 <표8>에서와 같이 산술 평균한 감마 값을 기초로 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션을 비교한 경우 T-Test 검정을 통해 0.002의 p값으로 상당한 유의성 확인한 것처럼, 통계적 유의수준 내에서 HW 캘리브레이션이 SW 캘리브레이션 대비 전반적으로 더 높은 품질 교정 결과를 보여줌을 확인할 수 있었다.
이와 같이 Delta E 를 기준으로 한 결과와 감마를 기준으로 한 결과가 다른 것은 톤 재현특성을 컬러와 밝기(luminance)로 나누어 접근한 결과로 추정해 볼 수 있다. 색차(delta E)를 기준으로 톤 재현특성을 평가 시 두 표본간의 차이는 없는 것으로 볼 수 있으며, 밝기(luminance)를 기준으로 톤 재현특성을 평가하는 경우 HW 캘리브레이션 미세하게 더 높은 품질을 보여는 것이 통계적으로 확인되었다.

4)백색의 휘도 (Luminance)

Avg. Luminance (cd/sqm)	1번 표본 모니터	2번 표본 모니터	3번 표본 모니터	4번 표본 모니터	5번 표본 모니터
HW 캘리브레이션	119.572	117.980	118.918	118.242	119.691
SW 캘리브레이션	117.890	120.917	121.912	118.571	122.268

<표9> 캘리브레이션 방법 별 백색 휘도의 산술평균 휘도

<표9>의 결과에서 보다시피 백색의 휘도에 있어 T-Test 를 통해 HW 캘리브레이션과 SW 캘리브레이션간 유의도 수준(significant level) 내에서 의미 있는 차이는 발견되지 않았다.

III. 결론

본 연구에서는 디스플레이 캘리브레이션에 대한 선행 연구들을 바탕으로 SW 캘리브레이션 대비 HW 캘리브레이션이 사진 이미지의 재현에 있어 얼마나 많은 품질의 차이가 있으며, 어떤 효익(benefit)이 있는지를 실험과 분석을 통해 살펴보았다. 특히 이미지의 특성 측정치를 통계적 유의성 검증을 통해 분석을 시도해본 점은 이미지 컬러의 특성에 대한 통계학적 융합으로 유의미하다 할 수 있다.

HW 캘리브레이션의 이점은 12비트(bit) 이상의 높은 비트의 사용으로 보다 자연스러운 톤 재현특성의 확보와 함께, 캘리브레이션을 위한 수정 값(corrected value)를 높은 비트를 사용하는 모니터 하드웨어 내의 LUT 에 적용하여 인터폴레이션(interpolation) 문제를 예방하는데 있다. 하지만 연구 결과 이러한 이점은 일부 캘리브레이션 속성에서 SW 캘리브레이션보다 의미 있거나 뚜렷한 차이를 보여주지는 못하는 것으로 확인되었다. 백색점과 백색 휘도의 경우 HW 캘리브레이션이 SW 캘

www.kci.go.kr

리브레이션에 비해 더 높은 교정 성능을 가진다고 보기는 어려운 것으로 판단된다. 톤 재현특성의 경우 감마를 기초로 데이터를 분석한 경우 결과의 차이에 있어 상당한 유의성이 있음을 통계적으로 확인하였으며, 전반적으로 미미하나마 HW 캘리브레이션이 SW 캘리브레이션 대비 더 나은 교정 성능을 가진다고 결론 내릴 수 있다. 흑색점(blackpoint) 역시 통계적 유의성이 확인된 가운데 HW 캘리브레이션이 수치적으로 더 나은 흑색점 품질을 보여주는 것으로 확인되었다.

따라서 HW 캘리브레이션은 톤 재현특성에 있어 보다 더 나은 교정 품질을 보여주며, 파인아트 등 정밀한 계조표현이 필요한 사진의 경우 HW 캘리브레이션을 통해 SW 캘리브레이션 대비 이익을 얻을 수 있다고 볼 수 있다. 하지만 일러스트 디자인, 타이포그라피와 같은 백터기반 2D디자인 분야는 HW 캘리브레이션을 통해 얻을 수 있는 이익이 적거나 없다고 볼 수 있으며, 이 경우 정확한 컬러를 요하는 경우에는 SW 캘리브레이션 만으로도 HW 캘리브레이션과 통계적으로 차이가 없는 이미지 및 컬러 품질을 확보할 수 있다고 결론지을 수 있다.

본 연구의 결과로 도출된 SW 캘리브레이션과 HW 캘리브레이션의 품질 차이 및 유용성을 바탕으로 사용자는 사진 이미지의 가장 일상적인 재현 매체라 할 수 있는 LCD 모니터에서 정확한 사진을 재현하기 위해서는 어떤 선택이 합리적인지 판단할 때 본 연구가 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 캘리브레이션 품질에 대한 상대적인 개량 평가를 위해 본 연구에서는 기본적으로 색차(color difference), Delta E를 변수로 설정하고 비교 분석을 시도하였다. 이에 따라 색 차로는 의미 도출이 어려운 비표본 영역에 대한 분석은 배제되어 있으며, 후속 연구에서 보다 나은 비교 분석 프레임워크가 개발되기를 기대한다.

참고 문헌

· Adobe Systems Incorporated (2005). *Adobe RGB(1998) Color Image Encoding (Technical report)*
· Bruce Fraser, Chris Murphy and Fred Bunting (2005). *Real World Color Management* (Second Edition.).CA:Peachpit Press.
· Eizo White Paper No. 03-003 Rev. A. *LCD Monitors for High-End Graphics: An Overview of the Color Edge Series.*
· Eizo White Paper (2007). *Calibration-the difference depends on the method applied.*
· ICC WhitePaper(2004). *Measurement - ICC Recommendations for Color Measurement.*
· ITU-R(Radiocommuniction Sector of ITU) (2002). *Parameter values for the HDTV stadards for production and international programme exchange* Mark D. Fairchild (2006). *Color Appearance Models* (Second Edition). West Sussex : Wiley
· Michael Stokes, Mattew Anderson, Srinvasan Chandrasekar, Ricardo Motta (1996), *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB, Version1.10* Tom P. Ashe (2014). *Color Management & Quality Output.* MA. Focal Press.

· LG전자 27EA83 소개 페이지, (2014): http://www.lge.co.kr/lgekr/product/detail/

www.kci.go.kr

LgekrProductDetailCmd.laf?prdid=EPRD.258255&pcatid=2400&catid=2400

· 삼성전자 U32D970Q 소개 페이지, (2014): http://www.samsung.com/us/computer/monitors/LU32D97KQSR/ZA

· 김환 (2014), LED백라이트를사용한 LCD 모니터의 수명, (2014): http://colormgmt.com/60210900314

· 이준신, 김도영 (2005). 『평판 디스플레이 공학』. 서울: 홍릉과학출판사

투고일 : 2014.11.3.
심사일 : 2014.11.22.
확정일자 : 2014.11.22.
논문발행예정일자 : 2014.11.30.
논문발행일자 : 2014.11.30.

www.kci.go.kr