

## 정확한 컬러재현 품질 확보를 위한 디스플레이 특성화 방법

### Display Characterization Methods for Accurate Color Representation Quality

김환<sup>1</sup>, 김동호<sup>2\*</sup>

Howard Kim<sup>1</sup>, Dong Ho Kim<sup>2\*</sup>

#### 요 약

본 연구에서는 컴퓨터 디스플레이의 컬러 재현 품질을 확보하고 정확한 이미지와 영상 콘텐츠 화질을 얻기 위한 최적의 디스플레이 컬러 특성화(characterization) 방법을 확인하였다. 주요 이미지 및 영상 콘텐츠에서 사용되는 색공간을 대상으로 행렬(matrix) 방식 및 LUT(look-up table) 방식으로 나누어 특성화를 진행하였으며, 연구 결과 전반적으로 행렬 방식 프로파일 대비 LUT 방식 프로파일 특성화가 더 높은 컬러 재현 품질을 보여주었다. 특히 색공간(color space)별 분석을 통해 원시색역(native color gamut)과 가장 다른 AdobeRGB 색공간에서 유의미한 차이를 보여주었다. LUT 방식 특성화시 사용되는 샘플링 패치의 개수는 115패치에서 175패치 수준에서 가장 이상적인 컬러 재현이 가능함을 확인하였다. 또한 샘플링 패치의 수를 증가하는 것은 도리어 재현 화질에 음의 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다. 전체 컬러의 안정적인 재현 수준을 가늠할 수 있는 색차(color difference) 표준편차는 LUT방식 115패치 샘플링에서 가장 낮은 수준을 보였다.

핵심어 : 컬러 프로파일링, 색상 관리, 모니터 캘리브레이션, 행렬 프로파일, 패치 샘플링

#### Abstract

In this study, the optimal display characterization method was identified to get the color reproduction quality of computer displays and to ensure accurate image and video content color quality. The color space mainly used for image and video content was characterized by dividing it into a matrix method and a LUT method. As a result of the study, the LUT method profile characterization shows higher color reproduction quality compared to the matrix profile. It shows a significant difference between the native color gamut and the most different AdobeRGB color space through color space analysis. It is confirmed that the most ideal color reproduction is possible at the level of 115 to 175 patches for the number of sampling patches used in characterizing the LUT. In addition, it is shown that increasing the number of sampling patches can negatively affect the reproduction quality. The standard deviation of color difference, which can estimate the stable reproduction level of all colors, shows the lowest level in 115 patch sampling.

Keyword : characterization, color profiling, color management, color calibration, LUT

1 Dept. of Information Technology & Media Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea [Graduate Student]  
e-mail: howardkim@seoultech.ac.kr

2 Dept. of Information Technology & Media Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul, Korea [Professor]  
e-mail: dongho.kim@seoultech.ac.kr (Corresponding author)

\* 본 논문은 2021년도 차세대컨버전스정보서비스학회 동계학술대회에서 발표한 논문을 수정 및 보완한 것임.

\* 이 논문은 2021년도 서울과학기술대학교 교내연구비 지원으로 수행되었습니다.

Received(February 13, 2022), Review Result(1st: March 3, 2022), Accepted(March 17, 2022), Published(March 31, 2022)



© 2022 The Authors. Published by NCSS.  
This is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.  
To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>.

## 1. 서론

1990년대 전자출판과 디지털 컬러 장치의 보급이 본격화되면서 디지털 장치에서의 정확한 컬러 재현의 요구 역시 증대되었다. 디지털 디스플레이의 정확한 컬러 재현은 그래픽, 사진, 영상 등 시각 기반 콘텐츠의 품질을 결정짓는 주춧돌의 역할을 하게 되며 디지털 컬러 매니지먼트에 필요성이 강조되었다.

멀티미디어와 전자출판 등 산업에서 최신 디지털 기술의 선도역할을 해 온 애플 컴퓨터사는 제조사나 운영체제, 장치에 관계없이 호환 가능한 개방적인 컬러 매니지먼트 시스템을 소개하였으며, 이 시스템은 이후 국제컬러컨소시엄(ICC)으로 발전하여 ISO 15076 표준을 정의하게 된다 [1].

현재 컴퓨터 산업에서 디스플레이, 인쇄, 카메라, 운영체제, 애플리케이션 등 모든 분류의 하드웨어 및 소프트웨어 제조사는 이 표준에 의거한 컬러 매니지먼트 시스템의 적용으로 상호 호환되는 컬러 정보의 전달이 가능하게 되었다 [2].

ISO 15076에서는 장치 등의 특성화 시 기술되는 표준 사양을 정의하고 있으며, 컬러를 재현하는 디스플레이, 프린터, 카메라 등 모든 장치는 장치별 고유한 컬러 재현 특성을 프로파일을 통해 특성화(characterization)할 수 있다. 각 장치의 컬러 재현 정보가 담긴 프로파일은 운영체제에 등록되며, 이후 애플리케이션에서 호출하여 장치 컬러 정보를 획득하고 애플리케이션 내에서 정확한 컬러를 출력하게 된다.

디스플레이 기술은 발전을 거듭하여 고선명 텔레비전(HDTV)에서 초고선명 텔레비전(UHDTV)로 발전하게 되었으며, 컬러 역시 실제 컬러를 보다 충실하게 재현할 수 있도록 더 넓은 색역(color gamut)의 지원이 필수 요건이 되었다 [3]. 이에 따라 장치별 재현 색역의 차이는 LCD, OLED 등 디스플레이의 기술 형태와 시대에 따라 큰 차이를 보이게 되었으며, 콘텐츠 소비자는 동일한 콘텐츠에 대해 다른 또는 틀린 컬러로 재현되는 경험을 하게 되며 보다 정확한 컬러 재현이 제품의 화질과 품질을 결정짓는 중요한 속성으로 자리잡게 되었다.

정확한 컬러 재현을 위한 디스플레이의 장치 특성화는 3x3 행렬을 사용한 방식과 일정 숫자의 샘플링 컬러로 구성된 LUT를 기반한 방식을 사용할 수 있다 [4][5]. 이에 본 연구에서는 프로파일링 유형에 따른 컬러 정확도의 특성과 경향에 대한 자세한 분석을 통해 정확한 컬러 재현품질 확보를 위한 최적의 특성화 설계와 각 유형별 경향성에 대한 분석을 시도하였다.

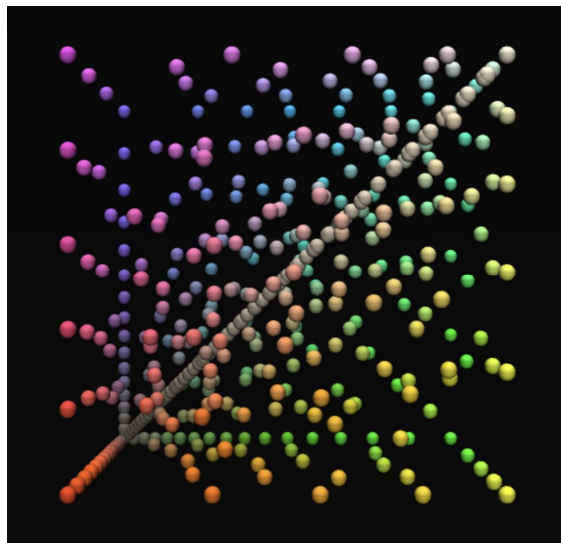
## 2. 특성화 과정

실험을 위해 본 연구에서는 시료 디스플레이로 DCI-P3 색역 100% 수준의 재현 커버리지를 가지는 삼성의 15.6인치 AM-OLED 방식 패널인 ATNA56YX03-0 노트북을 사용하였다. 운영체제는 MS

윈도우 11 프로 21H2 버전을 사용하였으며, 장치 특성화에는 argyllcms 오픈소스 컬러 매니지먼트 엔진을 사용하였다 [6]. 디스플레이의 측색은 X-Rite 사의 Eye-One Display Pro Plus 필터식 색채계와 i1Pro 2 분광계를 병행 사용하여 계측기의 특성에 따른 오차를 줄였다.

장치 특성화시 프로파일 유형에 따른 조건을 동일하게 맞추기 위해 BPC(Black Point Compensation)은 실시하지 않았으며, 캘리브레이션을 통한 VCGT를 생성하지 않고 애플리케이션에서 장치 특성화 프로파일만으로 컬러 매핑을 통해 컬러를 재현하도록 통제하였다.

행렬 방식 프로파일의 제작에는 원색 및 그레이스케일 샘플링만을 실시하였으며, LUT 방식 프로파일은 79, 115, 175, 425개의 샘플링 패치를 각각 사용하여 샘플링 숫자에 따른 프로파일의 재현 품질을 확인하였다 [7]. 425 샘플링 RGB 패치를 3차원으로 모델링한 결과는 아래 [그림 1]과 같다.



[그림 1] 425 샘플링 패치의 RGB 3D 모델링

[Fig. 1] RGB 3D modeling of 425 sampling patches

프로파일 유형별로 디스플레이 장치 특성화를 진행한 후 생성된 프로파일을 운영체제에 등록하고 ISO 15076 의 적용을 받는 애플리케이션 내에서 컬러 재현을 실시하여 실제 재현 컬러를 측정하였다. 평가를 위해 21개의 그레이스케일, 30개의 컬러 샘플링 패치를 사용하였으며, 동일한 계측장비를 사용하여 검증을 수행하였다.

### 3. 실험 결과

행렬 및 LUT 방식 프로파일에 대한 검증을 실시하여 51개의 샘플링 컬러에 대한 평균 색차, 최대 색차, 중앙 색차, 표준편차를 구하였다 [8]. 색차(color difference)는  $\Delta E_{00}$ 을 기준으로 산출하였다

[9].

	Measured Values				Color distance			
	L*	a*	b*	y	$\Delta L^*_{00/w}$	$\Delta C^*_{00/w}$	$\Delta H^*_{00/w}$	$\Delta E_{00}$
	100	0	0		0	-0.03	0	0.03
	0	0	0		0	0	0	0
	3.45	-0.22	-0.07	1.86	-0.06	0.34	-0.06	0.35
	8.95	-0.56	-0.14	2	-0.04	0.83	-0.14	0.84
	15.34	-0.37	0.01	2.07	0.04	0.53	-0.13	0.55
	21.1	-0.33	0.09	2.12	-0.11	0.49	-0.14	0.53
	26.78	-0.49	0.22	2.16	-0.15	0.74	-0.19	0.77
	32.54	-0.18	0.3	2.17	0.01	0.38	0.14	0.41
	38.09	-0.08	0.24	2.18	0.14	0.25	0.12	0.31
	43.11	0.17	0.34	2.21	-0.08	0.41	0.11	0.43
	48.35	0.16	0.46	2.21	0.01	0.5	0.14	0.51
	53.28	-0.02	0.41	2.23	-0.1	0.39	0.16	0.43
	58.37	0.04	0.37	2.23	0.03	0.35	0.15	0.38
	63.43	0.16	-0.19	2.22	0.17	0.28	-0.01	0.33
	68	0.08	-0.25	2.25	-0.02	0.25	-0.05	0.25
	72.96	-0.37	0.2	2.23	0.15	0.56	-0.24	0.62
	77.63	-0.01	0.27	2.23	0.14	0.25	0.15	0.32
	81.93	0.36	0.35	2.28	-0.08	0.6	0.14	0.63
	86.86	0.24	0.2	2.22	0.17	0.38	0.11	0.43
	91.32	0.13	0.13	2.22	0.12	0.2	0.09	0.25
	95.72	0.05	0.06	2.2	0.08	0.07	0.07	0.12
	25.44	48.62	38.71		-0.45	-0.04	-0.37	0.58
	54.27	80.86	71.93		-0.02	0.23	0.71	0.74
	68.58	49.27	23.96		-0.08	-0.05	0.07	0.12
	45.52	-46.98	47.85		-0.56	-0.18	0.05	0.59
	87.71	-79.22	80.86		-0.07	-0.02	0.02	0.07
	90.6	-56.42	49.31		-0.04	0.18	0.12	0.22
	11.39	39.41	-66.39		0.09	-0.29	-0.59	0.56
	30.29	66.67	-111.37		0.56	-0.21	-0.54	0.76
	58.11	26.07	-64.94		-0.08	0.05	0.04	0.09
	47.36	-30.36	-9.18		-0.44	0.05	0.13	0.46
	90.59	-50.82	-14.84		-0.05	0.04	-0.1	0.12
	94.26	-26.04	-8.91		-0.21	-0.23	0.31	0.44
	29.27	56.07	-36.32		-0.23	0.04	-0.02	0.23
	60.03	93.92	-60.73		-0.12	0.07	0.01	0.14
	80.08	41.97	-29.42		-0.12	0.11	0.03	0.16
	51.83	-10.03	55.84		-0.13	0.02	0.38	0.4
	97.47	-15.55	93.31		-0.08	-0.02	-0.08	0.12
	98.51	-9.17	41.4		-0.04	0.25	-0.07	0.26
	46.87	35.67	16.72		-0.11	0	-0.19	0.22
	62.8	-40.98	35.41		-0.03	0.2	0.19	0.27
	39.38	18.8	-47.17		-0.13	0.22	0.11	0.21
	64.19	-26.94	-8.75		-0.16	0.1	0.22	0.29
	49.25	44.66	-30.5		-0.12	0.08	-0.04	0.15
	68.03	-9.46	43.31		-0.17	0.07	0.41	0.45
	56.52	86.36	-17.68		-0.23	0.02	-0.08	0.24
	91.78	-48.36	86.76		-0.11	0.1	0	0.15
	65.65	-14.14	-53.53		0	0.1	-0.06	0.14
	88.81	-67.29	25.98		-0.11	0.11	0.08	0.17
	45.24	80.23	-85.24		-0.38	0.08	-0.01	0.39
	76.41	25.33	80.08		-0.22	0.08	-0.1	0.26

[그림 2] 115 샘플링 패치를 사용한 LUT 프로파일에서 sRGB 콘텐츠 컬러 정확도

[Fig. 2] sRGB Color accuracy in LUT profile using 115 sampling patches

실험에서는 단일 곡선 기반 행렬 프로파일, RGB 개별곡선 기반 행렬 프로파일, 79 샘플링 패치 기반 LUT 프로파일, 115 샘플링 패치 기반 LUT 프로파일, 175 샘플링 패치 기반 LUT 프로파일, 425 샘플링 패치 기반 LUT 프로파일 총 6개 유형의 특성화 프로파일을 바탕으로 검증을 진행하였

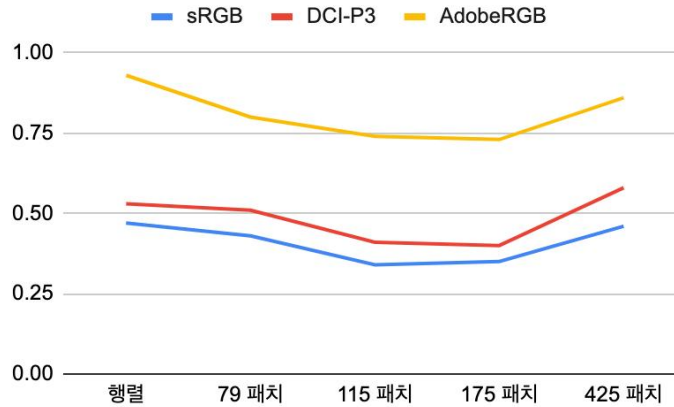
다. 실험 결과 중 가장 최적의 결과를 보인 115 샘플링 패치를 사용한 LUT 프로파일에서의 sRGB 콘텐츠 컬러 정확도 결과는 [그림 2]와 같다.

sRGB, DCI-P3, AdobeRGB 각 색공간의 콘텐츠에 대해 각각의 특성화 방법을 운영체제에 적용한 후 디스플레이를 계측하여 구한 색차는 [표 1]과 같다 [10].

[표 1] 색공간별 특성화 방법에 따른 색차

[Table 1] Color differences by characterization methods for each color space

색공간	재현 특성	1x곡선 행렬	3x곡선 행렬	LUT			
				79 패치	115 패치	175 패치	425 패치
sRGB	평균색차	0.46	0.47	0.43	0.34	0.35	0.46
	최대색차	0.91	0.98	1.28	0.84	0.80	1.56
	중앙색차	0.46	0.47	0.36	0.31	0.32	0.42
	표준편차	0.20	0.23	0.28	0.21	0.20	0.30
DCI-P3	평균색차	0.52	0.53	0.51	0.41	0.40	0.58
	최대색차	1.37	1.39	1.87	1.30	1.30	1.46
	중앙색차	0.50	0.50	0.46	0.37	0.33	0.51
	표준편차	0.23	0.24	0.32	0.24	0.28	0.31
AdobeRGB	평균색차	0.90	0.93	0.80	0.74	0.73	0.86
	최대색차	5.02	5.00	3.78	3.78	3.77	4.18
	중앙색차	0.50	0.57	0.21	0.43	0.41	0.22
	표준편차	1.10	1.08	0.86	0.85	0.86	0.91



[그림 3] 색공간별 행렬 방식 및 LUT 방식 프로파일의 평균 색차

[Fig. 3] Color Differences between Matrix and LUT Profile on each color space

평균색차를 기준으로 행렬 방식 프로파일과 LUT 방식 프로파일의 차이는 [그림 3]과 같다. 79

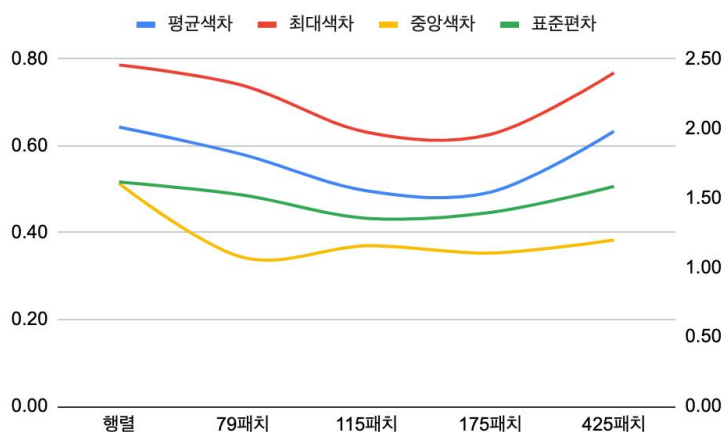
샘플링 패치를 사용한 LUT 방식 프로파일은 sRGB와 AdobeRGB 색공간 콘텐츠의 재현에 있어 큰 차이를 가져오지 않았으나 AdobeRGB 색공간 콘텐츠에서는 유의미한 차이를 보임을 확인할 수 있다. LUT 프로파일을 생성하기 위해 사용한 샘플링 패치의 개수는 79패치보다 115패치를 사용한 경우 더 낮은 평균색차 결과를 보여주었으나 이후 115패치와 175패치 샘플링에서는 유의미한 차이를 가져오지 못했다. 샘플링 패치를 늘려 425 패치 샘플링으로 LUT 프로파일을 생성한 경우 색차는 175패치 샘플링보다 오히려 증가하는 결과를 보여주었다.

각 색공간의 특성을 모두 반영하여 종합적으로 평가한 각 프로파일 특성별 색차 결과는 [표 2]와 같으며, 이를 도식화하여 [그림 4]와 같은 결과를 얻을 수 있었다.

[표 2] 특성화 방법에 따른 색차 평균

[Table 2] Average Color differences by characterization methods

색차	행렬	LUT			
		79패치	115패치	175패치	425패치
평균색차	0.64	0.58	0.50	0.49	0.63
최대색차	2.46	2.31	1.97	1.96	2.40
중앙색차	0.51	0.34	0.37	0.35	0.38
표준편차	0.52	0.49	0.43	0.45	0.51



[그림 4] 행렬 방식 및 LUT 방식 프로파일의 평균 색차

[Fig. 4] Color Differences between Matrix and LUT Profile

LUT 방식 프로파일은 중앙색차(Median Color Difference)에서 행렬 방식 프로파일 대비 유의미한 색차의 감소를 보였으며, 115패치에서 175패치 수준의 샘플링이 가장 낮은 색차를 가진 최적의 컬러 품질을 유도하였다. 샘플링 패치가 더 증가하는 경우 색차는 낮아지지 않고 오히려 유의하게 증가하여 컬러 품질을 악화시켰다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 컬러 재현의 품질을 확보하고 정확한 콘텐츠 컬러 화질을 확보하기 위한 최적의 디스플레이 특성화 방법을 실험을 통해 확인하였다. 연구 결과 전반적으로 행렬 방식 프로파일 대비 LUT 방식 프로파일 특성화가 더 높은 컬러 품질을 보여주었으며, 115패치에서 175패치 수준의 샘플링에서 가장 이상적인 컬러 재현이 가능함을 확인하였다. 또한 단순히 샘플링 패치의 숫자를 늘리는 것은 도리어 재현 화질에 악영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

시료 디스플레이의 기본 재현 색역(DCI-P3)이 아닌 다른 색공간(AdobeRGB) 콘텐츠에 대해서도 행렬 프로파일보다 LUT 프로파일이 더 낮은 색차 결과를 보여주었으며, 175 샘플링시 가장 낮은 색차를 보여주었다. 이를 통해 175패치 샘플링을 통한 LUT 방식 특성화가 가장 고품질의 컬러 재현이 가능함을 확인하였다.

본 연구를 바탕으로 디스플레이 프로파일링 등 특성화시 최적의 콘텐츠 화질을 확보할 수 있는 컬러 매니지먼트 가이드라인을 제시할 수 있을 것으로 기대하며, 추후 더 다양한 특성화 유형을 반영하여 광색역 디스플레이의 성능 도출과 컬러 관리에 기여할 수 있을 것이다.

본 연구는 한 대의 노트북 디스플레이 및 제한된 측정장비, 제한된 수의 샘플링 모델을 이용하여 실험한 결과로 범용적인 적용에 한계를 가지며, 디스플레이 자체의 재현 색역 속성에 따른 차이는 고려되지 않았다. 차후 많은 사례 시험을 통해 보다 구체적인 경향성이 도출되는 연구를 기대한다.

#### References

- [1] International Color Consortium, Image technology colour management-Architecture, profile format, and data structure. Specification ICC. 1: 2004-10 (Profile version 4.2. 0.0), 2004.
- [2] H. Kim, D. H. Kim, "OLED Display Color Characterization with Deep Learning Method", Next-generation Convergence Information Services Society Conference, December 29-30, 2021, Jeju, Korea, pp. 13-16.
- [3] M. Sugawara, S. Choi, D. Wood, "Ultra-High-Definition Television (Rec. ITU-R BT.2020): A Generational Leap in the Evolution of Television [Standards in a Nutshell]", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 31, no. 3, pp. 170-174, May 2014, doi: 10.1109/MSP.2014.2302331.
- [4] M. Fairchild, D. R. Wyble, "Colorimetric characterization of the apple studio display (flat panel LCD).", Munsell Color Science Laboratory Technical Report, Center for Imaging Science Rochester Institute of Technology, Rochester, NY, USA, July 1998. [online]. Available: scholarworks.rit.edu/article/920/.
- [5] R. Berns, "Methods for characterizing CRT displays", Displays, vol. 16, iss. 4, 1996, pp. 173-182, doi: 10.1016/0141-9382(96)01011-6.

- [6] Graeme Gill, "Argyll Color Management System Home Page", argyllcms.com, <http://www.argyllcms.com>, (accessed February 1, 2022).
- [7] K. E. Spaulding, G. J. Woolfe, E. J. Giorggianni, "Reference input/output medium metric RGB color encodings", PICS 2000: Image Processing, Image Quality, Image Capture Systems Conference, March 2000, Portland, OR, USA, pp. 155-163.
- [8] M. I. Cho, Y. S. Jeong, H. S. Kim, H. Kim, "A New Multimodal Database for Performance Evaluation in System Level", IT CoNvergence PRActice (INPRA), vol. 3, no. 3, September 2015, pp. 11-17.
- [9] G. Sharma, W. Wu, E. Dalal, "The CIEDE2000 color difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations", Color Research & Application, vol. 30, no. 1, 10 December 2004, pp. 21-30. doi: 10.1002/col.20070.
- [10] R. M. Soneira, "Display color gamuts: NTSC to Rec. 2020", Information Display, vol. 32, no. 4, August 2016, pp. 26-31, doi: 10.1002/j.2637-496x.2016.tb00920.x.