

工學博士學位論文

Digital 印刷에 있어서 Color의
最適化에 관한 研究



2008年2月

釜慶大學校大學院

印刷工學科

金在解

工學博士學位論文

Digital 印刷에 있어서 Color의 最適化에 關한 研究

指導教授 具 哲 會

이 論文을 工學博士 學位論文으로 提出함.



2008年 2月

釜慶大學校大學院

印刷工學科

金 在 解

金在解의 工學博士 學位論文을 認准함

2008年 2月 26日



主	審	工學博士	尹	鐘	太 (印)
委	員	農學博士	申	鍾	淳 (印)
委	員	工學博士	吳	盛	祥 (印)
委	員	工學博士	趙	가	람 (印)
委	員	工學博士	具	哲	會 (印)

목 차

목 차	i
List of Figures	iii
List of Tables	v
Abstract	vi
I. 서 론	1
II. 디지털 인쇄의 CMS	4
1. 디지털 인쇄에서 컬러 관리	4
2. 입출력 장치의 색변환	6
가. Gamma 보정	7
나. 다중회귀분석을 이용한 특성화	12
다. GOG 모델을 이용한 특성화	14
라. sRGB를 이용한 특성화	16
마. LUT를 이용한 특성화	19
3. 색역 사상(color gamut mapping)	24
4. 컬러 렌더링 인텐트(color rendering intent)의 분류	29
III. 실 험	31
1. Sample target 및 선형화 패치제작	31

2. 입력 장치의 색변환	32
가. 입력 장치의 gamma 보정	32
나. 입력 장치의 특성화	34
3. 출력 장치의 색변환	35
가. 모니터의 특성화	35
나. 디지털 인쇄기의 특성화	42
4. GCR(gray component replacement) 방법을 이용한 회색보정 ..	47
5. 색역 사상의 적용	48
6. 디지털 인쇄의 컬러 재현	48
IV. 결과 및 고찰	51
1. 입력 장치의 gamma 보정	51
2. 입력 장치의 색변환	54
3. 모니터의 색변환	59
가. 모니터의 색재현 영역	59
나. 모니터의 색변환	60
4. 디지털 인쇄기의 색변환	64
가. 디지털 인쇄기의 색재현 영역	64
나. 디지털 인쇄기의 색변환	65
(1) CMY에서 CIELAB로 색변환	65
(2) CIELAB에서 CMY로 색변환	69
5. 디지털 인쇄의 컬러 재현	70
V. 결 론	80
References	82

List of Figures

Figure 1.	CMS necessity in input and output devices	5
Figure 2.	ICC profile based color management workflow in printing process ..	6
Figure 3.	The relative comparison of nonlinear relationship between normalized R, G, B channel and normalized Y	8
Figure 4.	The end result of gamma correction in R channel	11
Figure 5.	C, M, Y coordinate system for trilinear interpolation	21
Figure 6.	1,331 lattice points in LUT	22
Figure 7.	Color space partitioning for tetrahedral interpolation	22
Figure 8.	Comparison of color gamut between monitor and printer ..	25
Figure 9.	Current gamut mapping methods	28
Figure 10.	Test target for use in experiment [(a) Colorchecker DC (b) IT 8.7/2 target, (c) Monitor linear target, (d) ECI2002 Visual target]	32
Figure 11.	Input device RGB to LAB color transformation test method	36
Figure 12.	Non-linear response for input RGB value and output Y in CRT [(a)R channel, (b) G channel, (c) B channel]	37
Figure 13.	Non-linear response for input RGB value and output Y in LCD [(a)R channel, (b) G channel, (c) B channel]	38
Figure 14.	The color transformation test of output device(monitor)	44
Figure 15.	Production process of initial LUT	45
Figure 16.	Schematic diagram for CMYK to CIELAB color transformation	45
Figure 17.	Schematic diagram for CIELAB to CMYK color transformation ..	46
Figure 18.	Gray generated by CMY and neutral gray	47
Figure 19.	The color transformation from input device to output device ..	50
Figure 20.	The gamma correction result of digital still camera	52

Figure 21. The gamma correction result of scanner	53
Figure 22. Color transformation results by linear multiple regression in scanner [(a) color difference histogram CIELAB, (b) original L^*b^* to calculated L^*b^* , (c) original L^*a^* to calculated L^*a^* , (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*]	57
Figure 23. Color transformation results by linear multiple regression in digital still camera) [(a) color difference histogram CIELAB, (b) original L^*b^* to calculated L^*b^* , (c) original L^*a^* to calculated L^*a^* , (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*]	58
Figure 24. Comparison of color gamut of LCD and CRT monitor	60
Figure 25. Color gamut of ISO, Japan color and digital print	65
Figure 26. Test results of CMY to LAB color transform using LUT for samples of color patches	68
Figure 27. Density variation according to dot area ratio after calibration	68
Figure 28. Color transformation results by scanner to CRT monitor [(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to monitor L^*b^* , (c) original L^*a^* to monitor L^*a^* , (d) original a^*b^* to monitor a^*b^*]	72
Figure 29. Color transformation results by scanner to LCD monitor [(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to monitor L^*b^* , (c) original L^*a^* to monitor L^*a^* , (d) original a^*b^* to monitor a^*b^*]	73
Figure 30. Lightness comparison after LAB to CMY color transformation using black generation	77
Figure 31. Chroma comparison after LAB to CMY color transformation using black generation	78
Figure 32. Comparison of CRT curves for rendering intent	79

List of Tables

Table 1. The Regression Method using in the Input Device Characterization ..	15
Table 2. Calibration Condition of sRGB Color Space in Display Device(CRT) ·	16
Table 3. Gamma Values of Input Device	33
Table 4. The Variable Values of GOG Model in CRT & LCD	40
Table 5. Results for Linear Multiple Regression Method in Input Device	54
Table 6. Color Difference Results for Characterization Methods in Monitor ...	63
Table 7. Color Difference Results for AtoB to BtoA	63
Table 8. Digital Printing Calibration and CMY to LAB Color Transformation Results	67
Table 9. LAB to CMY Color Transformation Result	70
Table 10. Forward and Reverse Transformation Result for LAB to CMY Color Transformation	70
Table 11. LAB to CMY Color Transformation Result using Black Generation Methods (GCR1, GCR2, GCR3, GCR4)	74

A Study on the Optimization of color in Digital Printing

Jae-Hae Kim

*Department of Graphic Arts Engineering, Graduate School,
Pukyong National University*

Abstract

In digital age, Printed matter the upgrade of the color printed matter is advanced with a multi kind small quantity production together quickly, and the demand of the consumer is more increased.

Also most printing equipments about digital brazier lower the color which as customer demands for a color from place printing which many portions with automatic movement is managed and the actual printed matter which as nearly reappear are raising its head with the problem which is important. Especially, comparison of the printing method where the color civil official of the printed matter is different specially from domestic digital printing than with scientific and objectivity method the system device profile is applied at printing and the standardization of printing becomes accomplished, but as ever color difference of the manuscript and occurs is a possibility of knowing from specific color.

Therefore, more for the system and efficient color civil official will be standardized and it is a necessary to confirm the objective data.

From the research which it sees consequently there is to a digital printed matter and in order to control the color reappearance which is a most big variable in optimization properly from input device until output device it

applies the color conversion method which is various in the color civil official as to minimize color difference of the manuscript and, it did to sleep, also it investigated the propriety of color conversion method.

Generally the input and output devices are not reappeared with system independent color price, and data of system dependent color is reappeared with nonlinear conversion because of the output signal price against an input signal price from the color reappearance which in like this system quality depends and input device or the monitor the difference of hue occurs in the manuscript and last output scandal color. It reduces like this difference in order to the color reappearance method for the place where there is a possibility of sharing at three branch phase,

First, all images always to show the answer back quality which is identical in quality of system, and calibration is phase.

In after words, system dependent color space what finds out the color reappearance quality of color conversion system in system independent color space characterization is phase.

It buys last from characteristic phase and position data and the conversion matrix it leads and it is done when and mathematics operation and the system independent color conversion become accomplished. The Color Management System (CMS) comes to be composed of like this three phases.

To color conversion method of input device the method which uses a line-shaped conversion and the LUT which use the multiplex regression analysis law together, especially there is also the method which uses a spectral diffraction presumption is already executed.

From the this study, In the method which is like this various accuracy to be high even in the sample color conversion the multiplex regression analysis law which is the possibility of doing quickly used. Also for a

color conversion from the monitor with the GOG (gain-offset-gamma), the LUT (look up table) and the sRGB are general with the characterization model which is applied.

So, It is like that it used this method together from the research which it sees and it tested, the GOG model where from in that the result is excellent in color conversion method of digital printing it applied. Also to color conversion method of the digital printer it used the LUT, 3dimension line-shaped interpolation laws and a tetrahedron interpolation laws. With after words, it is same like this test result it got a same conclusion.

1. The scanner which is a input device and the digital camera all CCD input sense but, by the input price of the manuscript which the scanner is accurate in base even color of the color conversion manuscript which uses a multiplex regression analysis and got the result where the scanner which it kicks is better the digital camera than. Also, Color of the scanner the lightness which it kicks, the chroma compared to it was added an extra weight in hue-angle difference and it appeared but, the digital camera all was added an extra weight in the lightness, the chroma and hue-angle difference and color difference occurred.

2. The GOG model even color difference it is a linear target from the average color conversion which applies the model appeared the CRT monitor fewer the LCD monitor than, case of IT 8.7/2 target the CRT appeared more highly the LCD and it got the result which is better than color conversion method of the sRGB and the 1D LUT.

The GOG model in addition calculates the gain and a offset parametric variable in the gamma parametric variable which is a cause of relationship in non-liner shape from quality anger process with the possibility of

raising an accuracy is in the monitor color civil official of digital printing is useful confirmed.

In order to confirm the accuracy and an efficient characteristic of monitor color conversion method also political change exchange and adverse change exchange repetition result even color difference it accomplishes the CRT monitor compared to shows the result where the LCD monitor is better and it is used.

3. From the CMY which uses the LUT and 3 dimension line-shaped interpolations from the digital printer even color difference of the color conversion manuscript with the CIELAB and comparison got the result which is good with 1.311. Also, From the CIELAB which uses the LUT and tetrahedral interpolation laws with the CMY the color conversion manuscript and even colordifference from the CIELAB with the CMY color converting from the CMY color error occurred step phase interpolation converting than occurred plentifully with the CIELAB.

4. From color reappearance of digital printing case of monitor, The XYZ which it converts in multiplex regression analysis of input device it makes extreme to double an adverse change exchange matrix, it applies the reverse GOG model and after color converting the patch of the result most which buys color difference of the manuscript and shows color difference below 5 at monitor RGB price.

Also, The XYZ which is transmitted from the case input device which is a printer it makes at LAB price to convert an extreme, when the LAB price which is converted calculating the CMY with the LUT and tetrahedral interpolations the color conversion which considers the black quantity was more accurate.

Also, In order to minimize color difference of the manuscript and it shows the result where the relative rendering intent is most good from the color reverse thought which it applies.

keyword : digital printing, gamut mapping, gamma correction, ICC profile, characterization



I. 서론

디지털 시대에 맞추어 인쇄물도 다품종 소량생산과 함께 컬러의 고급화가 빠르게 진행되고 있으며, 또한 소비자의 컬러에 대한 이해의 수준이 높아질수록 인쇄 품질의 향상 요구도 증대되고 있다.

현재 대부분의 인쇄 장비들은 디지털화로 인하여 많은 부분들이 자동으로 관리되고 있는데 인쇄에서 색을 관리한다는 의미는 고객이 요구하는 색과 실제 인쇄물이 얼마나 가깝게 재현될 수 있느냐가 그 문제이다. 특히 국내 디지털인쇄에서 인쇄물의 컬러 관리는 다른 인쇄방식보다 비교적 과학적이고 객관적인 방법으로 인쇄시에 장치프로파일(device profile)이 적용되어 인쇄의 표준화가 이루어지지만, 특정 컬러에서 여전히 원고와의 색차가 발생함을 알 수 있다. 그러므로 더욱 체계적이고 효율적인 컬러 관리를 위해서는 규격화된 객관적인 컬러 데이터를 확인할 필요가 있다.^{1~3)}

일반적으로 디지털 인쇄원고의 제작에 사용되는 스캐너(scanner)와 디지털 카메라(digital still camera : DSC)는 CCD(charge coupled device)를 기반으로 하는 입력 장치로 무엇보다 이미지를 기록할 때 정확한 컬러 표현 및 관리가 요구되고 있다. 또한 입력된 이미지는 서로 다른 환경에서 다양한 출력 장치인 CRT(cathode-ray tube)나 LCD(liquid crystal display) 모니터를 통하여 디스플레이하거나 또한 상용 프린터나 인쇄기를 이용하여 디지털 이미지를 출력한다. 이때 입력 및 출력 장치들은 장치 독립적인 컬러 값으로 이루어지지 못하고, 장치 의존적인 컬러 값으로 재현됨으로써 이러한 장치 특성에 의존된 색재현과 입력 장치나 모니터에서 입력 신호 값에 대한 출력 신호 값의 비선형적인 변환 때문에 원고와 최종 출력물의 컬러에 색상의 차이가 발생한다.

따라서 출력 장치에서 올바른 컬러 재현을 위하여 먼저 입력 장치의 정확한 이미지 캡처도 중요하지만 장치를 통하여 기록한 이미지가 장치 의존적 컬러 정보값을 장치에 영향을 받지 않는 장치 독립적인 컬러 재현으로 처리할 필요가 있다. 올바른 컬러재현 방법은 세 단계로 이루어진다. 먼저 모든 이미지가 장치의 특성에 항상 동일한 응답특성을 나타내도록 하는 캘리브레이션(calibration) 단계이다. 이때 입력 장치의 gamma 보정이 이루어지고, 또한 gray balance가 고유의 장치값과 측정된 휘도 또는 명도 간의 관계로 이루어진다.^{3,4)}다음으로 장치의존 색공간을 장치독립 색공간으로 색변환시 장치의 컬러재현 특성을 알아내는 것이 특성화(characterization) 단계이다. 마지막으로 특성화 단계에서 구해진 데이터와 변환 매트릭스를 통하여 수학적 연산을 하면 장치 독립적인 색변환(color conversion)이 이루어진다. 이러한 세 단계로서 장치들의 컬러 매니지먼트 시스템(color management system : CMS)이 구성되어진다. 그러므로 CMS의 기본적인 구동원리는 장치들의 장치 독립적인 색변환에 기초를 두고 있으므로 올바른 색변환은 정확한 색재현을 위하여 필요한 CMS의 도입이 매우 중요하고, 최종 인쇄물의 컬러 재현에 많은 영향을 미치고 있다.

입력 장치의 색변환 방법에는 다중회귀 분석법을 이용한 선형 변환,^{3,4)} LUT를 함께 이용한 방법,⁵⁾ 특히 분광추정을 이용한 방법^{6,7)}도 이미 실행된 바가 있다. 본 논문에서는 이러한 다양한 방법 중 가장 적은 샘플에도 정확도가 높으면서 색변환을 빠르게 할 수 있는 다중회귀 분석법을 이용하였다.

또한 입력 장치를 통하여 입력된 이미지를 인쇄하기 전에 교정으로 활용하는 CRT나 LCD 모니터인 경우, 많은 회사들이 각기 다른 종류의 디스플레이 장치를 제조해 내고 있다. 또한 현실적으로 디스플레이 장치에서 동일한 컬러를 표현할 수는 없다. 왜냐하면 디스플레이 장치의 밝기 재현에 대한 차이와 형광소자 및 기준 백색면의 색도차이, 장치의존적인 색공간의

활용뿐만 아니라 디스플레이 gamma 특성의 차이, 주변 광원의 연색성 및 인간 시각 등의 다양한 조건 때문에 동일한 컬러 이미지를 재현할 수 없다.⁸⁾ 이런 다양한 문제점 해결의 한 방안으로 출력 장치인 모니터에서도 입력 장치와 동일한 방법의 CMS가 이루어진다. 특히 모니터에서 색변환을 위하여 활용되는 특성화 모델로는 GOG(gain-offset-gamma)와 LUT(look up table) 및 sRGB가 가장 일반적이다.^{9,10)} 그러므로 본 연구에서는 이 방법을 함께 사용하여 실험하였고, 그 중에서 가장 결과가 우수한 GOG 모델을 디지털 인쇄의 색변환 방법에 적용하였다. 또한 디지털 인쇄기의 색변환 방법에는 LUT와 3차원 선형 보간법, 4면체 보간법을 이용하였다.

따라서 디지털 인쇄물 제작은 입력 장치에서 출력 장치까지 모두 컬러 관리가 수행되어야만 올바른 컬러 재현이 이루어진다. 먼저 입력 장치에서 다중회귀 분석을 통하여 장치 의존적 색공간인 R, G, B 신호값을 선형화하여 장치 독립적인 색공간 CIE XYZ, LAB으로 색변환한 후 모니터와 인쇄기로 보낸다. 모니터에서는 CIE 삼자극치를 역변환 매트릭스를 곱하여 선형 R, G, B 신호값으로 색변환한 후 다시 역 GOG을 적용하여 모니터 R, G, B 신호값으로 변환하는 것이 올바른 방법일 것이다. 또한 디지털 인쇄기인 경우는 입력 장치에서 전송된 LAB값을 LUT와 4면체 보간법으로 CMY로 변환한 후 다시 LUT와 3차원 선형 보간법으로 CMY를 LAB값으로 역변환하고, 역변환된 LAB값에 black양 생성방법으로 GCR를 적용하였고, 인쇄 장치의 컬러재현 영역에 입력된 컬러가 재현될 수 있도록 색역 사상을 실시하였다. 이렇게 색변환한 값을 측색기를 이용하여 직접 모니터를 측색하거나 인쇄물을 측색하여 원고 이미지와의 색차를 구하였다.

따라서 본 연구에서는 디지털 인쇄물의 최적화에 가장 큰 변수인 컬러 재현을 올바르게 처리하기 위하여 입력 장치에서부터 출력 장치까지 다양한 색변환 방법을 컬러 관리에 적용함으로써 원고와의 색차를 최소화 하고자 하였으며, 또한 색변환 방법의 타당성을 검토하였다.

II. 디지털 인쇄의 CMS

1. 디지털 인쇄에서 컬러 관리

오늘날에는 전문적인 용도뿐만 아니라 일반 컴퓨터에도 다양한 입력 및 출력 장치를 부착하여 이미지 시스템을 구축할 수 있으며 이러한 다양한 장치의 특성에 따라 동일한 이미지도 Figure 1과 같이 색의 차이로 다르게 재현된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 1993년 전자 색이미지 분야의 주요 8개 회사로 구성된 ICC(International Color Consortium)가 설립되었다. 참여업체는 platform 제조회사인 Apple, Sun, Silicon Graphics, 소프트웨어 제조회사인 Microsoft, Adobe, Taligent, 필름 제조회사인 Kodak, Agfa이었으며 그 후 Pantone, Linotype-Hell, Trumatch, Cannon, Harlequin, X-rite, Tektronix 등의 회사들이 동참, 현재는 60개가 넘는 회사들이 회원으로 등록되어 있다.

본 연구의 ICC에 의한 컬러 매니지먼트의 구조는 Figure 2와 같이 각각의 장치 프로파일과 PCS(Profile Connection Space : PCS)로 구성된다. 장치 프로파일은 장치의존 색공간과 장치 독립적인 색공간 사이의 색정보 데이터 교환에 필요한 정보를 제공하며 PCS란 입력과 출력 장치 프로파일들 간의 색교환을 위한 가상 색공간(abstract colour space)을 말한다. 여기에서 제안된 PCS는 참조 지각 환경(reference viewing environment)에서 참조 이미지 매체(reference imaging medium)를 통해 재현되었을 때, 요구되는 색순응을 갖는 CIE 측색(colorimetry)이라고 할 수 있다.¹¹⁾ 이때 참조 지각 환경이란 white point가 D₅₀, 조도가 800 lux, 2,000 lux의 환경을 말하며, 참조 매체는 색역의 한계가 없는 이상

적인 프린트, CIE 측색은 XYZ 또는 LAB를 말한다. 따라서 장치 프로파일은 장치 종속적인 좌표와 PCS 상에서의 색좌표 간의 변환 데이터를 포함해야 한다. 대부분의 장치 프로파일들은 장치 종속좌표와 PCS 좌표사이의 3차원 LUT를 사용하는데 보통 LUT를 만드는데 필요한 데이터는 장치 특성화, 색순응, 색역 사상 (gamut mapping) 프로세스의 결과를 포함하기 때문에 입력 장치 프로파일과 출력 장치 프로파일을 두 번 거치는 동안 색역 사상과 색순응 과정이 두 번 이루어진다는 문제가 생긴다. 또한 프로파일 검출기마다 프로파일을 생성하는 방식이 달라 프로파일들 간의 상호운용(interoperability)이 좋지 않다. 1998년 ICC는 이러한 ICC PCS의 단점들에 대한 대안으로 프린트 중심의 PCS를 사용하는 방법과 프로파일과 CMS를 분리시켜 CMS에서 프로파일을 통해 입력된 LUT와 측정된 조건을 이용한 색순응 모델, 색역 사상 과정을 진행하도록 하는 방법이 제시되었다.^{12, 13)}

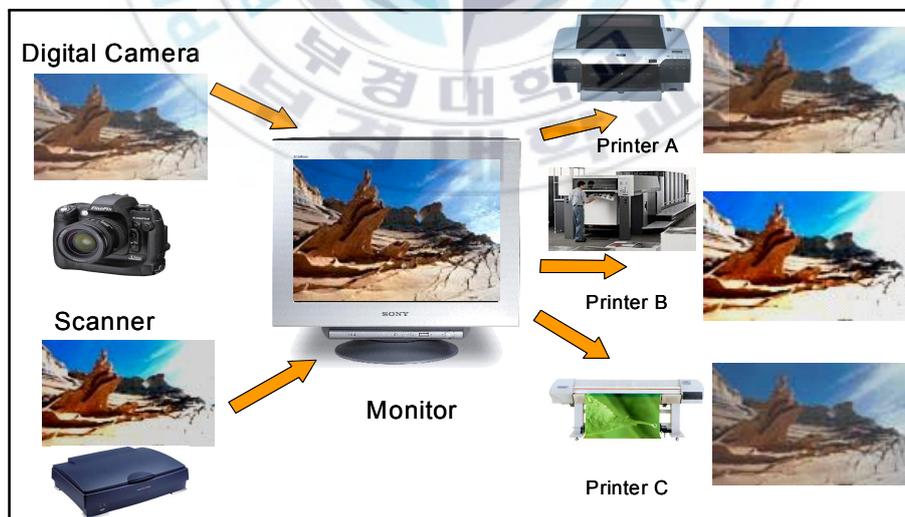


Figure 1. CMS necessity in input and output devices.

2. 입출력 장치의 색변환

CCD를 기반으로 하는 스캐너와 디지털 카메라와 같은 입력 장치를 통하여 기록한 이미지는 장치 의존적 컬러 정보값으로 이루어진다. 이러한 값은 장치가 바뀌면 변할 수 있으므로 장치에 영향을 받지 않는 장치 독립적인 컬러 재현으로 처리할 필요가 있다.

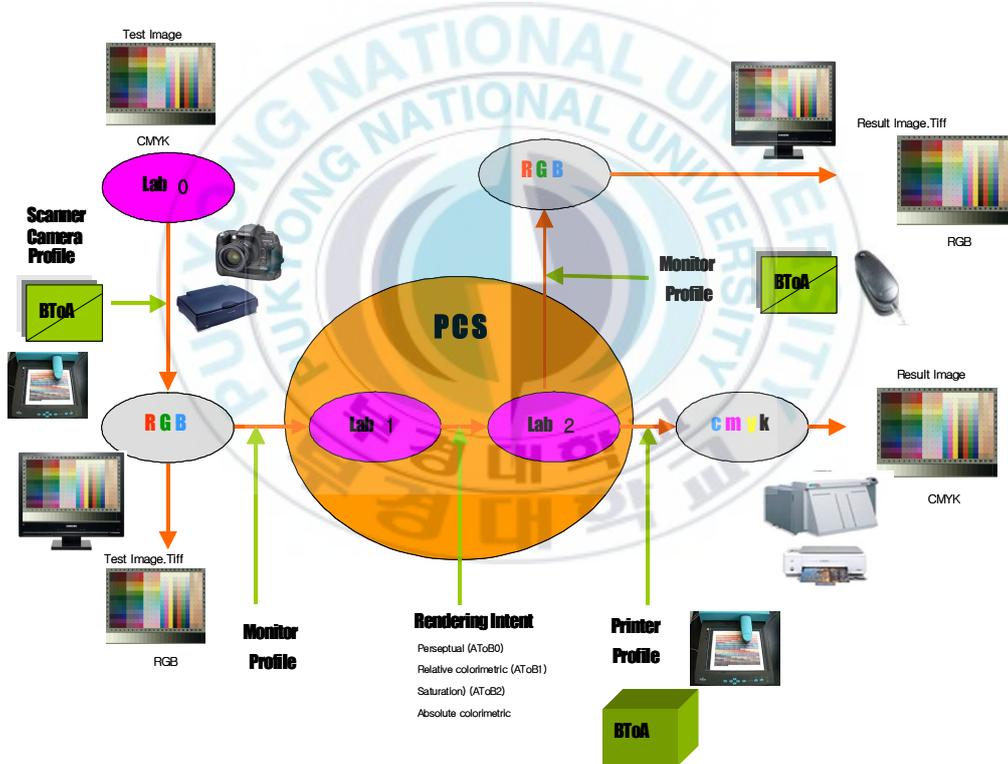


Figure 2. ICC profile based color management workflow in printing process.

먼저 컬러 재현은 스캐너나 디지털 카메라가 항상 동일한 응답특성을 나

타내도록 하는 초기화 단계인 캘리브레이션 단계이다. 이때 장치의 정확한 캘리브레이션이 이루어지고, 특히 스캐너의 gray balance는 고유의 장치값과 측정된 휘도 또는 명도 간의 관계로 이루어진다. 장치의 보정 단계가 이루어진 후에 입력된 신호값을 출력할 때 장치의 컬러 재현특성을 알아내는 것이 특성화 단계이다. 일반적으로 장치 특성화 단계에서는 입력 장치에 적합한 CIE가 정한 표준 target을 사용한다. 또한 표준 target의 입력값 RGB를 CIELAB, XYZ 값으로 측정하여 나타내기 위하여 측색계로 측색하고, 컬러 변환 단계에서 필요한 데이터로 저장한다. 이러한 장치의 특성을 데이터로 기록한 것이 ICC 프로파일로 행렬 연산을 위한 계수값이나 테이블 형태로 저장된다.

특성화 단계에서 구해진 데이터와 변환 매트릭스를 통하여 수학적으로 연산하면 장치 독립 신호 데이터로 변환하는데 이 단계가 색변환이다. 이러한 세 가지 단계는 CMS에서 이루어지고, 특히 장치의 특성화와 색변환의 정확한 실행이 가장 중요하다.¹³⁾

입력 장치의 색변환 방법의 경우 다중회귀 분석법을 이용한 선형 변환,^{3,4)} 다중회귀분석과 3차원 보간으로 구하는 LUT를 함께 이용한 방법,⁵⁾ RGB 신호를 이용하여 물체의 분광 반사율을 추정하는 분광추정 방법,^{6,7)} 신경회로망에 의한 비선형 색변환 방법^{14,15)}도 이미 실행된 바가 있다. 이러한 다양한 색변환 방법 중 본 논문에서는 가장 일반적이고 적은 샘플에도 정확도가 높으면서 색변환을 빠르게 할 수 있는 선형다중회귀 분석법을 이용하였다.

가. Gamma 보정

Gamma는 정규화된 R, G, B 채널의 강도에 대응하는 휘도 Y값 사이의

비선형(non-linear) 관계를 나타내는 수치적 매개변수이다. 여기서 채널의 강도는 R, G, B 각각의 채널에 주어지는 전압의 크기이다. R, G, B 채널의 강도가 가장 작은 경우는 black이고, 강도가 점점 증가하면 순수한 R, G, B가 된다. 이때 Figure 3과 같이 각각의 채널에 대응하는 Y값과의 관계는 선형 관계가 아닌 비선형 관계를 나타낸다. 이러한 비선형 관계로 컬러의 재현에서 전반적으로 화상이 어두워지게 된다. 특히 중간톤 영역에서 색도 영역과 하이라이트 영역에 비해 상대적으로 비선형의 정도가 심하게 나타나므로 중간톤 영역의 밝기가 상대적으로 색도 영역과 하이라이트 영역의 밝기보다 더욱 어둡게 나타난다.¹⁶⁾

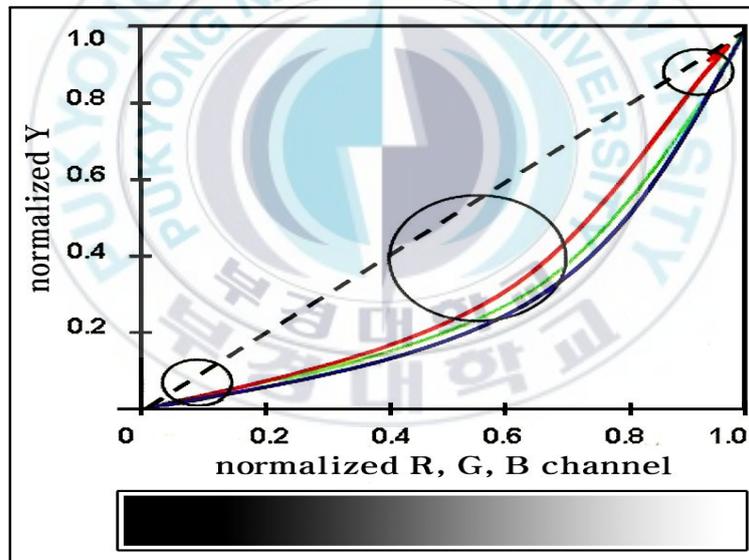


Figure 3. The relative comparison of nonlinear relationship between normalized R, G, B channel and normalized Y.

따라서 이러한 Y와 R, G, B 각 채널간의 비선형 관계를 선형 관계로 변형시켜 주어야만 올바른 컬러가 재현될 것이다. Gamma 보정 과정은 먼저

R, G, B 데이터를 아래의 식 (1)을 이용하여 정규화한 R_{nr} , G_{nr} , B_{nr} 값을 구한다. 이러한 데이터의 정규화가 필요한 이유는 color chart의 표면이 균일하지 못하여 조사된 광을 동일하게 반사하지 못하고, 입력 장치의 끊임 없는 전기신호의 변동과 CCD의 변화, 양자화 오류(quantization error), 기록속도의 불균일 때문에 입력된 데이터를 그대로 사용할 경우 감마 계산이나 모델링 과정의 계산에서 오류를 발생시키기 때문이다.

$$\begin{aligned}
 R_{nr}(i) &= 100 \times \frac{(R_{value} - R_{black})}{(R_{white} - R_{black})} \\
 G_{nr}(i) &= 100 \times \frac{(G_{value} - G_{black})}{(G_{white} - G_{black})} \\
 B_{nr}(i) &= 100 \times \frac{(B_{value} - B_{black})}{(B_{white} - B_{black})}
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 i 는 1, 2, 3, ..., n 개의 컬러 패치를 나타내고, 또한 R_{value} , G_{value} , B_{value} 는 컬러 패치의 각각의 채널 값을 나타내며, R_{black} , G_{black} , B_{black} 은 black 패치의 채널 값이며, R_{white} , G_{white} , B_{white} 은 white 패치의 채널 값을 각각 나타낸다. 이와 같이 black과 white 값으로 정규화하는 것은 black과 white로 이루어진 거리가 다른 컬러들 사이의 거리와 비교하여 가장 크기 때문이다. 정규화의 핵심은 이처럼 자체 데이터에서 최장 거리의 값을 찾아 이 값을 기준으로 R, G, B 데이터를 정정하는 것이다.

일반적으로 gamma 값의 계산 방법은 최적화(optimization)를 적용하는 방법과 대수(logarithm)를 적용하는 방법이 있다. 실제 gamma 값의 계산에 사용되는 데이터는 측색된 Y 값과 입력 장치에서 입력된 R, G, B 데이터를 정규화한 R_{nr} , G_{nr} , B_{nr} 값을 사용한다. 본 연구에서는 대수를 적용한 gamma 계산 방법으로 아래 식 (2), (3), (4), (5)로 구하였다.

$$\begin{aligned}
Y_R &= R_{nr}^\gamma \\
Y_G &= G_{nr}^\gamma \\
Y_B &= B_{nr}^\gamma
\end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)는 대수를 적용하면 1차 함수식이 되고, 양변에 log를 취하여 식 (3)으로 변환한다.

$$\begin{aligned}
\log Y_R &= \log R_{nr}^\gamma \\
\log Y_G &= \log G_{nr}^\gamma
\end{aligned} \tag{3}$$

$$\begin{aligned}
\log Y_B &= \log B_{nr}^\gamma \\
\log Y_R &= \gamma \log R_{nr} \\
\log Y_G &= \gamma \log G_{nr} \\
\log Y_B &= \gamma \log B_{nr}
\end{aligned} \tag{4}$$

여기서 γ 는 독립변수 $\log R_{nr}$ 과 종속변수 $\log Y_R$ 인 1차식인 직선식의 계수가 된다. 즉 독립변수와 종속변수인 회귀식의 회귀계수로 γ 을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned}
Y_R &= \gamma R_{nr} \\
\gamma &= (R_{nr}' R_{nr})^{-1} (R_{nr}' Y_R)
\end{aligned} \tag{5}$$

따라서 Y와 R, G, B 채널 간의 비선형 관계를 선형 관계로 변형시켜 주는 gamma 보정은 식 (6)과 같이 정규화된 Y와 정규화된 각각의 R, G, B 채널 간의 비선형 관계에서 계산된 R, G, B 각 채널에 gamma 값의 역수를 적용함으로써 이루어진다.

$$\begin{aligned}
 Y_R(i) &= R_{nr}(i)^{(1/\gamma_R)} \\
 Y_G(i) &= G_{nr}(i)^{(1/\gamma_G)} \\
 Y_B(i) &= B_{nr}(i)^{(1/\gamma_B)}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

이 식을 Figure 4와 같이 그래프로 나타내면 gamma 보정 전의 곡선이 gamma 보정 후에는 역곡선으로 만듦으로서 최종적으로 정규화된 Y와 정규화된 각각의 R, G, B 채널 간의 비선형이 선형으로 재현되었다.

또한 대수를 적용한 방법으로 식 (7)과 같이 계산된 gamma의 역수를 정규화된 R_{nr} , G_{nr} , B_{nr} 각각에 지수로 적용하여 선형화되며, 선형화된 각각의 값인 R_γ , G_γ , B_γ 의 데이터를 기본 채널 값으로 사용한다.

$$\begin{aligned}
 R_\gamma(i) &= R_{nr}(i)^{(1/\gamma_R)} \\
 G_\gamma(i) &= G_{nr}(i)^{(1/\gamma_G)} \\
 B_\gamma(i) &= B_{nr}(i)^{(1/\gamma_B)}
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

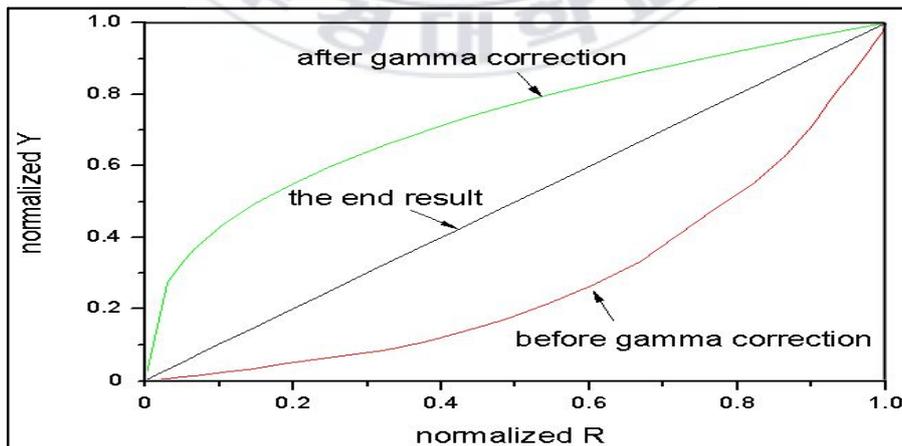


Figure 4. The end result of gamma correction in R channel.

나. 다중회귀분석을 이용한 특성화

회귀분석(multi regression analysis)^{3,4)}은 종속변수를 설명하는 독립변수의 수가 두 가지 이상인 조건에서 분석을 하는 방법이다. 다중회귀분석은 독립변수로 지정되는 변수들이 복합적으로 작용하여 종속변수에 미치는 영향을 감안함과 동시에 주위의 독립변수의 영향을 보정한 다음, 독립변수 각각의 독립된 영향을 계수로서 추정한다.

일반적으로, 다중회귀분석을 이용한 컬러 변환방법은 장치 종속적인 컬러 공간에서 표준 컬러 공간인 장치 독립적인 컬러 공간으로 변환 시에 이 두 공간 사이의 상관관계를 다항식으로 접근하여 연립방정식을 찾는 것으로 식(8)과 같다.

$$V_{ij} = a_1 q_{i1} + a_2 q_{i2} + \dots + a_m q_{im} \quad (8)$$

여기서 a_m 은 회귀계수이며 벡터값인 행렬로 표현할 수 있다. q_{im} 은 독립변수로서 R, G, B 신호값에 해당하고, V_{ij} 는 종속변수로서 우리가 알고자 하는 XYZ 또는 LAB 값이 된다. 또한 회귀계수 a 는 식(9)에 의하여 얻을 수 있다.

$$a = (MM^T)^{-1}(MV) \quad (9)$$

입력값의 개수가 n 이라면 식 (10)과 같이 M (R, G, B 신호값)는 $m \times n$ 사이즈의 매트릭스가 되며, 여기서 m 은 다항식의 차수이다. M^T 는 매트릭스 M 의 행과 열을 교환함으로써 얻어진 M 의 전치행렬이다. 따라서 $n \times m$

사이즈의 매트릭스가 된다.

$$M = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix}$$

$$M' = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{21} & v_{31} & \dots & v_{n1} \\ v_{12} & v_{22} & v_{32} & \dots & v_{n2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{1m} & v_{2m} & v_{3m} & \dots & v_{nm} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$MP = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_{11} \\ P_{22} \\ P_{33} \\ \vdots \\ P_{nm} \end{bmatrix}$$

스캐너의 경우 1991년 Henry, Kang은 선형 회귀분석으로 RGB 신호 값을 장치 독립 컬러 CIEXYZ로 변환하여 평균색차 ΔE^*_{ab} 1.63을 얻었으며,³⁾ 또한 1993년 Haneishi는 평균색차 ΔE^*_{ab} 2.0의 결과를 얻은바 있다.⁷⁾ 디지털 카메라인 경우에는 2004년 Cheung와 Westland가 회귀분석을 이용하여 색변환하였다.¹⁷⁾ 본 논문에서도 선행연구로서 Table 1과 같이 3×3 , 3×8 , 3×9 , 3×11 , 3×14 , 3×16 , 3×20 의 매트릭스 사이즈를 이용하여 실험하였다. 일반적으로 매트릭스 사이즈가 증가할수록 색변환의 정확도도 증가한다. 실험에서도 색변환 후 원고와의 색차를 구한 결과 3×20 의 매트릭스가 가장 우수하였으므로 본 논문에서는 3×20 매트릭스를 구하여 적용하였다.

다. GOG 모델을 이용한 특성화

디스플레이 장치의 특성화는 R, G, B 채널의 톤 재현 곡선과 선형화된 RGB 값을 삼자극치 XYZ로 변환하는 매트릭스로 나타낼 수 있다. 톤 재현 곡선은 입력 신호와 출력 휘도와의 비선형 관계를 보정하는데 이용되고, 이러한 보정에 GOG 모델을 사용한다.

GOG 모델은 1993년 Berns^{8,9)}에 의해 소개된 디스플레이 장치의 특성화 모델로 현재 가장 일반화된 모델로 알려져 있다. 이 방법은 식 (11)과 같이 매개변수 gamma에 gain과 offset를 추가한 gain-offset-gamma를 적용하는 모델로써 최적의 상태는 두 변수 gain 값과 offset 값의 합이 1이 되어 gamma 값만 남는 것이다. 그러나 모니터에서 실제 gain과 offset의 합이 1이 되는 경우는 거의 없으며, 또한 휘도와 콘트라스트 세기에 따라 매개변수의 값들이 달라지므로 정확한 계수값을 찾는 것이 필요하다.

본 실험에서는 GOG 모델을 입력 장치의 특성화 모델로 이용하여 R, G, B 각 채널의 신호에 대한 선형화된 출력 휘도 RL, GL, BL을 구하였다.

$$\begin{aligned}
 RL &= \begin{cases} [g(\frac{d_r}{2^N-1}) + o]^{v_r} ; & [g(\frac{d_r}{2^N-1}) + o] \geq 0 \\ 0 ; & [g(\frac{d_r}{2^N-1}) + o] < 0 \end{cases} \\
 GL &= \begin{cases} [g(\frac{d_g}{2^N-1}) + o]^{v_g} ; & [g(\frac{d_g}{2^N-1}) + o] \geq 0 \\ 0 ; & [g(\frac{d_g}{2^N-1}) + o] < 0 \end{cases} \\
 BL &= \begin{cases} [g(\frac{d_b}{2^N-1}) + o]^{v_b} ; & [g(\frac{d_b}{2^N-1}) + o] \geq 0 \\ 0 ; & [g(\frac{d_b}{2^N-1}) + o] < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{11}$$

Table 1. The Regression Method using in the Input Device
Characterization

Matrix size	Regression
3 × 3 Matrix	$X = a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B$ $Y = a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B$ $Z = a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B$
3 × 9 Matrix	$X = a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB + a_{17}R^2 + a_{18}G^2 + a_{19}B^2$ $Y = a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB + a_{27}R^2 + a_{28}G^2 + a_{29}B^2$ $Z = a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB + a_{37}R^2 + a_{38}G^2 + a_{39}B^2$
3 × 14 Matrix	$X = a_{10} + a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB + a_{17}R^2 + a_{18}G^2 + a_{19}B^2$ $+ a_{110}RGB + a_{111}R^3 + a_{112}G^3 + a_{113}B^3$ $Y = a_{20} + a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB + a_{27}R^2 + a_{28}G^2 + a_{29}B^2$ $+ a_{210}RGB + a_{211}R^3 + a_{212}G^3 + a_{213}B^3$ $Z = a_{30} + a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB + a_{37}R^2 + a_{38}G^2 + a_{39}B^2$ $+ a_{310}RGB + a_{311}R^3 + a_{312}G^3 + a_{313}B^3$
3 × 20 Matrix	$X = a_{10} + a_{11}R + a_{12}G + a_{13}B + a_{14}RG + a_{15}RB + a_{16}GB + a_{17}R^2 + a_{18}G^2 + a_{19}B^2$ $+ a_{110}RGB + a_{111}R^2G + a_{112}G^2B + a_{113}B^2R + a_{114}R^2B + a_{115}GR + a_{116}B^2G + a_{117}R^3$ $+ a_{118}G^3 + a_{119}B^3$ $Y = a_{20} + a_{21}R + a_{22}G + a_{23}B + a_{24}RG + a_{25}RB + a_{26}GB + a_{27}R^2 + a_{28}G^2 + a_{29}B^2$ $+ a_{210}RGB + a_{211}R^2G + a_{212}G^2B + a_{213}B^2R + a_{214}R^2B + a_{215}GR + a_{216}B^2G + a_{217}R^3$ $+ a_{218}G^3 + a_{219}B^3$ $Z = a_{30} + a_{31}R + a_{32}G + a_{33}B + a_{34}RG + a_{35}RB + a_{36}GB + a_{37}R^2 + a_{38}G^2 + a_{39}B^2$ $+ a_{310}RGB + a_{311}R^2G + a_{312}G^2B + a_{313}B^2R + a_{314}R^2B + a_{315}GR + a_{316}B^2G + a_{317}R^3$ $+ a_{318}G^3 + a_{319}B^3$

여기에서 g 는 gain이고, o 는 offset, γ 는 gamma를 나타내는 변수들이다. 또한 dr 은 0에서부터 255까지 입력 장치의 R, G, B 구동 신호 값이다. N 은 입력 장치에서의 컬러 재현에 필요한 bit 수를 나타내며, 본 논문에서는 전자출판의 디지털 이미지 제작의 기본인 8bit를 적용하였다.

식 (11)에서 선형화된 RL, GL, BL를 모니터 R, G, B 채널의 최대 입력 값에서 삼자극치 XYZ를 추출하여 구한 3 × 3 색변환 매트릭스와 선형적으로 곱하여 식 (12)과 같이 장치 독립 컬러 값 XYZ를 구할 수 있었다.

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{r,\max} & X_{g,\max} & X_{b,\max} \\ Y_{r,\max} & Y_{g,\max} & Y_{b,\max} \\ Z_{r,\max} & Z_{g,\max} & Z_{b,\max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{bmatrix} \quad (12)$$

라. sRGB를 이용한 특성화

sRGB의 색공간은 다른 종류의 색공간에 비해 훨씬 적은 색영역을 가지므로 최선의 선택은 아니고, 치명적이지 않은 다소간의 손실을 인정하여 선택하는 보편의 의미가 크다.^{18,19)} sRGB 색공간은 기준 가시 환경에 대한 정의와 표준 장치계의 측색적 정의 등의 두 가지 부분에서 제안된 장치 독립적인 공간이다. sRGB 기준 가시 환경은 Table 2와 같고, 입력 장치를 통하여 입력된 컬러 이미지를 sRGB 색공간으로 최적화하여 특성화하였다.

Table 2. Calibration Condition of sRGB Color Space in Display Device(CRT)

Condition	sRGB
Luminance Level	80 cd/m ²
Illuminant White	D ₆₅ (x=0.3127, y=0.3290)
Image Surround	20% Reflectance
Encoding Ambient Illuminance Level	64 lux
Encoding White Point	D ₅₀ (x=0.3457, y=0.3585)
Encoding Viewing Flare	1.0%
Typical Ambient Illuminance Level	200 lux
Typical White Point	D ₅₀ (x=0.3457, y=0.3585)
Typical Viewing Flare	5.0%

D₆₅에서 삼자극치와 선형 RGB와 관계는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3.2410 & -1.5374 & -0.4986 \\ -0.9692 & 1.8760 & 0.0416 \\ 0.0556 & -0.2040 & 1.0570 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} \quad (13)$$

선형 RGB 값은 식 (14)과 같이 비선형 sR'G'B' 값으로 변환한다.

이때 만약 $R, G, B \leq 0.00304$ 면

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= 12.92 \times R \\ G'_{sRGB} &= 12.92 \times G \\ B'_{sRGB} &= 12.92 \times B \text{ 이고,} \end{aligned} \quad (14)$$

또한 $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.00304$ 이면, 식 (15)과 같다.

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= 1.055 \times R_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\ G'_{sRGB} &= 1.055 \times G_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \\ B'_{sRGB} &= 1.055 \times B_{sRGB}^{(1.0/2.4)} - 0.055 \end{aligned} \quad (15)$$

식 (16)로서 8bit 비선형 sR'G'B'의 256 컬러를 가진 이미지의 RGB 색 요소를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} R_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times R'_{sRGB}) + 0.0 \\ G_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times G'_{sRGB}) + 0.0 \\ B_{8bit} &= ((255.0 - 0.0) \times B'_{sRGB}) + 0.0 \end{aligned} \quad (16)$$

여기서 $R'_{sRGB}, G'_{sRGB}, B'_{sRGB}$ 를 식 (17)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R'_{sRGB} &= R_{8bit}/255.0 \\ G'_{sRGB} &= G_{8bit}/255.0 \\ B'_{sRGB} &= B_{8bit}/255.0 \end{aligned} \quad (17)$$

또한 비선형 sR'G'B' 값을 선형 R, G, B 값으로 각각 변환할 수 있다.

이때 만약 $R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} \leq 0.04045$ 이면, 식 (18)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= R'_{sRGB}/12.92 \\ G &= G'_{sRGB}/12.92 \\ B &= B'_{sRGB}/12.92 \text{ 이고,} \end{aligned} \quad (18)$$

$R_{sRGB}, G_{sRGB}, B_{sRGB} > 0.04045$ 이면, 식 (19)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} R &= [(R'_{sRGB} + 0.055)/1.055]^{2.4} \\ G &= [(G'_{sRGB} + 0.055)/1.055]^{2.4} \\ B &= [(B'_{sRGB} + 0.055)/1.055]^{2.4} \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 최종적으로 식 (20)과 같이 XYZ로 변환시킬 수 있다.

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} \quad (20)$$

마. LUT를 이용한 특성화

출력 장치의 색보정은 장치의존 색공간인 CMY나 RGB에서 장치독립 색공간인 CIELAB나 CIEXYZ로 변환하는 것이다. 특히 출력 장치인 프린터의 특성을 모델링하여 색을 변환하는데는 망점 이론에 근거를 둔 Neugebauer식,^{20~22)} Yule-Nielsen²³⁾ 모델, Clapper-Yule²⁴⁾ 식, 감색이론을 기초로 한 Beer-Bouguer와 Kubelka-Munk²⁵⁾ 이론이 있다. 최근에는 기초 측정데이터를 근거로 하는 회귀분석법, Neural Network, LUT 등이 색변환에 이용되고 있다. LUT 방식의 경우, 색변환이 우수하고 하드웨어에 적용 시키기가 상대적으로 용이하며, 적용이 다양하여 이용범위가 넓다. 따라서 본 연구에서는 LUT 방식을 이용한 색변환 방법을 사용하였다.

출력 장치의 색변환에 사용되는 LUT의 크기는 CIELAB 색공간에서, CMY 3색을 11간격으로 균등 샘플링한 $11^3=1,331$ 개로 구성되어 있다. 또한 LUT 방법에 의한 색변환은 분할(packaging or partition), 추정(extraction or find), 보간(interpolation or computation)의 3가지 단계로 이루어진다.

분할단계에서는 입력되어지는 색 공간을 등 간격으로 분할시키고, 이때 n 이 샘플 수라고 할 때 $(n-1)^3$ 개의 사면체와 n^3 개의 격자점이 만들어진다. 이미 알고 있는 입력되는 색 공간의 정보가 각각의 격자점에 해당하고, n^3 개의 패치로부터 측정된 값과 함께 참조 테이블이 생성된다. 추정 단계에서는 임의의 값 P 가 격자점 위에 있지 않을 경우 P 점을 포함한 입방체를 찾는다. 보간 단계에서 3차원 보간법을 이용하여 P 점 위치에서의 색상값을 계산한다.

기하학적인 3차원 보간법에는 3차원 선형(trilinear)법, 프리즘(prism)법,²⁶⁾ 피라미드(pyramid)법,²⁷⁾ tetrahedral법²⁸⁾ 등 여러 가지가 있다. 최초의 LUT를 이용한 3차원선형 보간법은 Pugsley에 의해 1974년에 발표되었고, 프리

즘 보간법은 1982년 Lanamori, Fumoto, Kotera에 의해 발표되었다. 피라미드 보간법은 1982년 Flanklin에 의해 특허로 발표되었으며, 4면체 보간법의 경우 Korman과 Yule에 의해 1971년 스캐너의 망점에 사용되었다. 여기서 3차원 선형 보간법을 제외한 나머지 방법들은 분할된 공간의 어느 위치에 입력 값이 있는지를 찾는 추정단계를 포함하고 있다.

프리즘 보간법은 8개의 격자점으로 이루어진 입방체를 1/2로 나누어 2개의 프리즘 형태를 구성하고, 임의의 점이 위치하는 프리즘을 추정한 후 6개의 격자점으로부터 임의의 점의 위치를 계산하는 방식이다.

Pyramid 보간법은 입방체를 1/3로 나누어 3개의 pyramid형으로 분할하고, 임의의 점이 위치하는 pyramid를 추정한 후, 5개의 격자점으로 임의의 점을 계산한다.

또한 Tetrahedral 보간법은 입방체를 6개의 4면체로 분할하고, 임의의 점이 위치하는 4면체를 추정한 후, 3개의 격자점으로부터 임의의 점의 위치를 계산하는 방식이다. Prism법, pyramid법, tetrahedral법 등은 데이터 처리량이 감소하나 보간의 정확도가 3차원 선형 보간법(trilinear interpolation)방법에 비해 떨어진다.¹⁷⁾

본 연구에서는 Figure 5와 같이 ECI2002의 1,331개의 패치로부터 CMY에서 CIELAB로 변환에 사용되는 LUT을 제작하기 위해서 3차원 선형보간법을 사용하였다. 임의의 점 $P(C, M, Y)$ 의 L, A, B 값은 각각 $L(C, M, Y), A(C, M, Y), B(C, M, Y)$ 로 표시할 수 있으며, $P_0(C_0, M_0, Y_0), P_1(C_1, M_1, Y_1)$ 는 각각 P_{000}, P_{111} 로 나타낼 수 있다. 따라서 임의의 점 $P(C, M, Y)$ 는 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다. 이 좌표계를 CIELAB 균등 색공간에 적용하면 임의의 점 $P(C, M, Y)$ 에서의 색도좌표 LAB는 각각 $L(C, M, Y), A(C, M, Y), B(C, M, Y)$ 로 나타낼 수 있으므로 L, A, B 의 보간값을 계산할 수 있다.⁹⁾ 계산된 LUT를 ICC 프로파일의 AToB Tag에 저장하여 CMY

에서 CIELAB 로 색변환하는데 사용하였다.

$$P(C, M, Y) = S_0 + S_1\Delta C + S_2\Delta M + S_3\Delta Y + S_4\Delta C\Delta M + S_5\Delta C\Delta Y + S_6\Delta M\Delta Y + S_7\Delta C\Delta M\Delta Y \quad (21)$$

여기서 ΔC , ΔM , ΔY 및 계수 S_0, S_1, \dots, S_7 은 각각 아래의 식 (22)로 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta C &= C - C_0 \\ \Delta M &= M - M_0 \\ \Delta Y &= Y - Y_0 \\ S_0 &= P_{000} \\ S_1 &= (P_{100} - P_{000}) / (C_1 - C_0) \\ S_2 &= (P_{010} - P_{000}) / (M_1 - M_0) \\ S_3 &= (P_{001} - P_{000}) / (Y_1 - Y_0) \\ S_4 &= (P_{110} - P_{010} - P_{100} + P_{000}) / [(C_1 - C_0) (M_1 - M_0)] \\ S_5 &= (P_{101} - P_{001} - P_{100} + P_{000}) / [(C_1 - C_0) (Y_1 - Y_0)] \\ S_6 &= (P_{011} - P_{001} - P_{010} + P_{000}) / [(M_1 - M_0) (Y_1 - Y_0)] \\ S_7 &= (P_{111} - P_{011} - P_{101} - P_{110} + P_{100} + P_{001} + P_{010} - P_{000}) / [(C_1 - C_0) (M_1 - M_0) (Y_1 - Y_0)] \end{aligned} \quad (22)$$

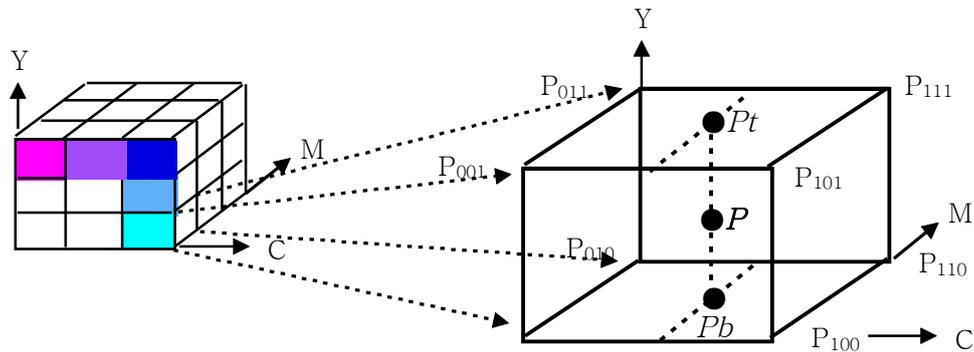


Figure 5. C, M, Y coordinate system for trilinear interpolation.

이러한 방법으로 제작된 LUT는 CMY 공간에서는 Figure 6의 (a)와 같이 균등한 간격을 가지고 있으므로 상대적으로 보간 에러가 작은 3차원 선형변환 방법을 사용할 수 있다. 그러나 CIELAB 공간에서는 Figure 6의 (b)와 같이 불균등한 배열을 가지게 되어 선형 보간 방법을 사용할 수 없다. 따라서 CIELAB에서 CMYK로 색변환하는데 사용할 균등 LUT을 계산하기 위해서 Figure 7과 같이 4면체(tetrahedral) 보간 방법을 사용하였다.

4면체 보간법의 경우 CIELAB 3차원 공간에서 무게중심 보간법(barycentric interpolation)으로 보간이 가능하므로 CIELAB를 CMY로 색변환할 수 있다.

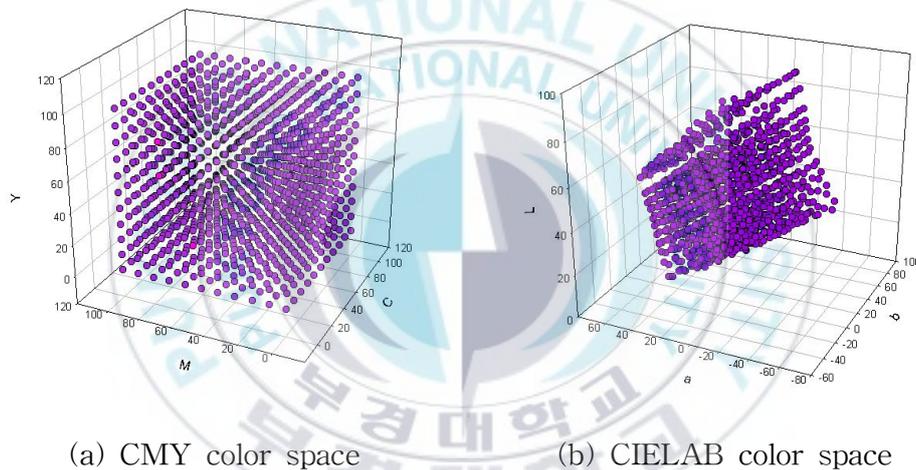


Figure 6. 1,331 lattice points in LUT.

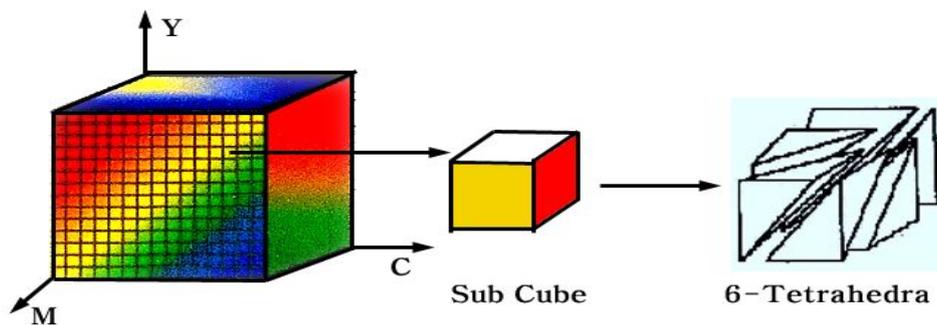


Figure 7. Color space partitioning for tetrahedral interpolation.

4면체 보간법의 실행은 먼저 장치의 색역을 4면체로 분할하고 입력되는 임의의 색이 어느 4면체에 속하는지를 추정한 후 보간하는 3가지 단계로 이루어진다.

분할단계에서는 입력되어지는 색 공간에서 n 개의 샘플이 있을 때 $(n-1)^3$ 개의 6면체와 n^3 개의 격자점(lattice point)이 생성된다. Figure 7의 단위 6면체를 다시 대각선 축에 접하는 6개의 4면체로 나누면 $6 \times (n-1)^3$ 개의 4면체로 분할되며, 4면체의 체적 V_t 는 아래 식 (23)으로부터 구할 수 있다.

$$V_t = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix} \quad (23)$$

추정 단계에서는 임의의 값 P 가 격자점 위에 있지 않을 경우 LUT에서 P 점을 포함하는 4면체를 찾게 된다. 입력된 임의의 색 P 를 포함하는 4면체를 찾으면 4면체와 입력점을 연결하여 다시 4개의 부4면체(sub-tetrahedron)로 분할한다.

또한 분할된 부4면체의 체적 V_i 는 다음의 식 (24)에 의해 계산된다.

$$V_i = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} P_{i+1} & P_{i+2} & P_{i+3} & P \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{vmatrix}, i=1,2,3,4 \quad (24)$$

식 (24)로 분할된 부4면체의 체적 V_i 를 구하고, 식 (25)과 같이 부4면체의 체적 V_i 와 체적 V_t 의 비를 가중치 W_i 라 하고, W_i 를 구한다.

$$W_i = V_i / V_t, i=1,2,3,4 \quad (25)$$

여기서 입력되는 점 P 가 4면체의 내적에 있기 위해서는 부4면체의 부피 V_i 의 합이 V_t 와 같아야 하므로 아래의 식 (26)을 만족해야 한다.

$$\sum_{i=1}^4 W_i = 1 \quad , \quad or \quad V_t = \sum_{i=1}^4 V_i \quad (26)$$

보간 단계에서 식 (27)의 무게 중심 보간법을 이용하여 P위치에서의 CIELAB값을 부4면체에 대응하는 각 꼭지점 P_i 로 입력된 색을 다른 색 공간으로 보간한다.

$$\begin{aligned} C^* &= \sum_{i=1}^4 W_i L_{Pi}^* \\ M^* &= \sum_{i=1}^4 W_i a_{Pi}^* \\ Y^* &= \sum_{i=1}^4 W_i b_{Pi}^* \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 L_{Pi} , a_{Pi} , b_{Pi} 는 사면체의 각 꼭지점 $P_i(i=1,2,3,4)$ 에서의 CIELAB 값을 나타낸다.

3. 색역 사상(color gamut mapping)

인간의 눈에 의해 감지되거나 각종 입출력 장치가 재현할 수 있는 전체 색의 범위를 색역(color gamut)이라 한다. Figure 8에서 일반적으로 사용하는 모니터와 인쇄물 사이의 색역 차이를 CIELAB 공간상에 나타내었다.

모니터에서 화면에 출력되는 색역과 인쇄물에서 재현되는 색역 사이에는 상당한 차이가 발생하므로 모니터 상에서 재현되는 모든 영역의 색을 인쇄

$$\begin{aligned}
L^* &= 116 \left[\frac{Y}{Y_0} \right]^{1/3} 16 & \left(\frac{Y}{Y_0} > 0.008856 \right) \\
L^* &= 903.3 \left(\frac{Y}{Y_0} \right) & \left(\frac{Y}{Y_0} < 0.008856 \right) \\
C_{ab}^* &= [a^{*2} + b^{*2}]^{1/2} \\
h_{ab} &= \arctan \left(\frac{b^*}{a^*} \right)
\end{aligned} \tag{28}$$

색역 사상방법은 색역 절단(color gamut clipping)방법과 색역 압축(color gamut compression)방법으로 나누어진다.³¹⁾

색역 절단방법은 재현될 장치의 색역 내부의 색은 그대로 유지하고 외부의 색을 사상될 색역의 경계면으로 사상하는 방법으로 사상된 영상이 재현될 장치의 색역에서 최대 채도값을 나타내는 장점이 있으며, 색 변화 또한 최소화 되는 장점을 가진다.

색역 압축방법은 원 색역의 휘도나 채도의 최대, 최소값을 재현될 장치의 최대 최소로 조정하면서, 나머지 색은 선형 또는 비선형적으로 사상하는 방법이다. 이러한 압축 방법은 전체적인 색의 분별력은 유지되지만 입력 영상의 색이 고려되지 않으면 불필요한 색의 왜곡을 발생시켜, 색의 차이가 더 커지게 되는 단점을 가진다.

색역 사상 방법을 색역 사상이 이루어지는 과정에 따라 분류하면 연속적 사상 방법(continuous mapping)과 동시 사상방법(simultaneous mapping) 방법으로 구분할 수 있다.³²⁾

동시 사상방법은 휘도와 채도값을 동시에 사상하는 방식이지만, 연속적 사상 방법은 휘도와 채도의 사상이 2단계로 순차적으로 이루어지는 방법으로, 먼저 휘도사상 후 채도사상이 이루어진다.

휘도사상 방법은 선형 압축(linear compression)방법과 비선형 압축(non linear compression, knee compression)방법, 절단(hard and soft clipping)

방법 등으로 나누어진다. 선형 압축방법은 원고와 재현물 사이의 휘도를 선형적으로 압축하며, 비선형 압축방법은 비선형 함수에 의해 변환하는 방식이다. 절단방법은 원고와 재현물의 내부 색역은 유지하고, 외부 색역의 휘도만 재현될 색역의 휘도에 접근시키는 방식이다.

채도사상에서는 휘도사상이 이루어진 후, 일정한 색상각(hue angle)에서 색역 외부의 점들을 재현될 장치의 색역으로 압축을 하거나 절단을 하게 된다. Figure 9와 같이 현재 사용되고 있는 대표적인 색역사상 방법은 최단입점 클리핑(nearest-point clipping)³³⁾ 방법, 센터로이드 클리핑(centroid clipping)³⁴⁾ 방법 및 스트레이트 클리핑(straight clipping)³⁵⁾ 방법과 최대 채도 클리핑(maximum chroma clipping) 방법이 있다.

Figure 9(a)의 최단입점 클리핑 방법은 3차원 색공간에서 인쇄물의 색역을 벗어나는 모니터 상의 색역 성분들을 색차가 가장 작게 나타나는 색역의 경계면으로 사상하는 방법이다.

1996년에 Kato와 Ito는 최단입점을 찾는 방법으로 1994년 CIE ΔE^*_{ab} 색차를 이용하였다.³³⁾ 이 방법은 원고와 재현물 사이의 색도점이 1:1로 사상되는 것이 아니라 원고 상의 다수의 점들이 재현물 상의 한점으로 동시에 사상되는 성분이 많이 발생하여 전체 이미지의 콘트라스트를 저하시키고 디테일을 감소시키는 원인이 되었다.

Figure 9(b) 방법은 1984년에 Sara가 처음으로 제안하였으며, 모니터의 휘도를 유지하고 채도만을 줄이는 방법이다. Laihanen도 1987년에 Hunter LAB 색공간 즉, LABHUN 색공간에서 이 방법을 적용하였다.³⁶⁾ 이 방법에서는 먼저 색상을 일정하게 유지하면서 모니터의 휘도를 인쇄물의 휘도와 동일하게 압축한 다음에 채도를 사상하게 된다.

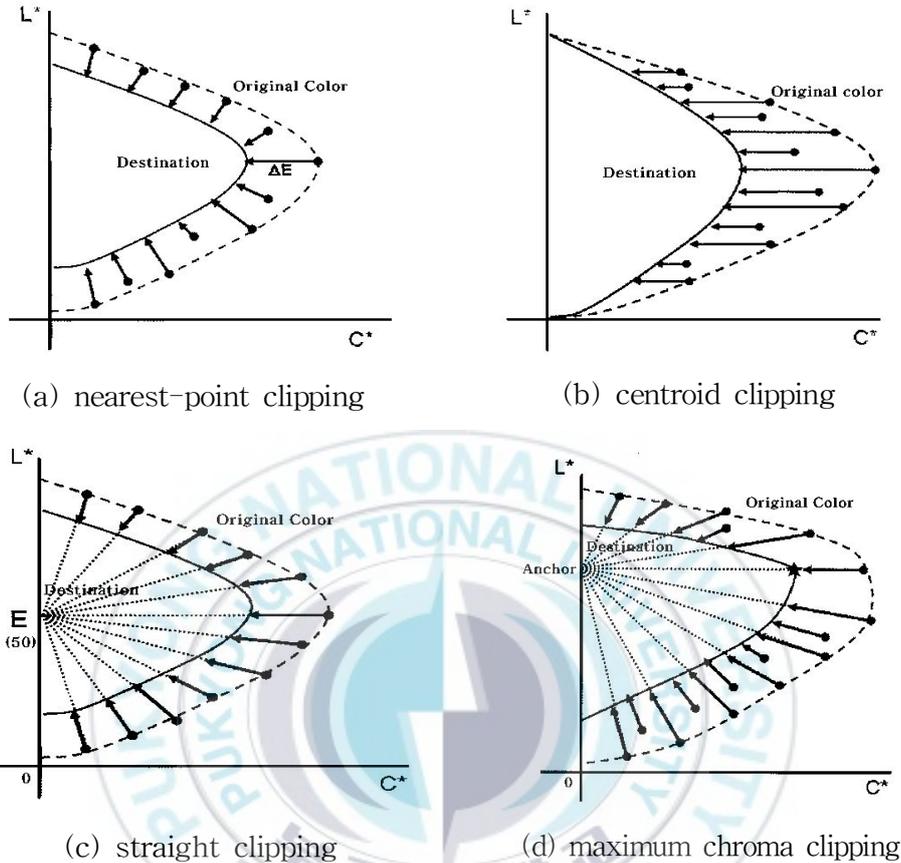


Figure 9. Current gamut mapping methods.

Figure 9(c) 방법은 1984년에 Sara가 처음으로 사용하였으며, Laihanen은 1987년에 LABHUN 색공간에 대하여 이 방법을 적용하였다. 이 방법은 출력장치의 색역에서 벗어난 색을 출력장치 색역의 명도 중심($L^*=50$)을 기준점(anchor point)으로 하여 모니터의 휘도와 채도를 동시에 사상하는 방법이다. 이 방법은 스트레이트 클리핑 방법의 1차원적인 채도 사상에서 blue와 green영역에서 채도가 급격히 감소하는 단점을 보완하기 위하여, 색상을 일정하게 유지시키면서 휘도와 채도를 동시에 사상하는 2차원적인 색역사상 방법 중 하나이다. 이 방법에서는 최단입점 클리핑 방법에서 발

생하는 원고 상의 다수의 점이 재현물 상의 한 점으로 동시에 사상되는 단점을 보완함으로써 색역사상 전후의 색도점이 1:1로 대응하게 되어 디테일을 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

Figure 9(d) 방법은 인쇄물의 색역을 벗어나는 모니터의 색을 인쇄물이 가지는 최대 색도점을 기준점으로 하여 명도와 채도를 동시에 사상하는 방법이다.

4. 컬러 렌더링 인텐트(color rendering intent)의 분류

ICC는 색재현의 목표를 지각(perceptual), 절대 측색(absolute colorimetric), 상대 측색(relative colorimetric), 고채도(saturation) 등의 4가지로 분류한다.^{37,38)}

지각 색재현 방식은 측색적으로 정확하지 않지만 시각적으로 일치하는 색재현을 목표로 하며, ICC 프로파일에서 이를 위해 색순응 모델을 도입하였다. 일반적으로 사진 이미지 제어에 사용되며, ICC 프로파일 적용시 참조 프로파일 색영역은 전체 색상에 대하여 색순응을 유지하면서 목적프로파일 색재현 안으로 압축되기 때문에 색재현 밖의 색상을 재현하는데 유효하다.

상대 측색적 색재현은 원고와 재현물의 XYZ 삼자극치 값이 동일한 색재현을 말한다. 원고와 재현물의 분광 반사율은 동일하지 않더라도 조건등색을 만족하면 된다. 여기서 삼자극치 Y는 항상 100으로 정규화 되지만, 조명광원의 백색으로 정규화 할 때를 절대 측색적 색재현이라 하고, 출력되는 인쇄물의 백색점에 정규화 시킬 때를 상대 측색적 색재현 방식이라 한다. ICC 프로파일 적용시 인간의 지각은 피인쇄체의 백색점에 순응하기

때문에 참조 프로파일의 백색점이 목적 프로파일의 백색점으로 색재현이 되며, 인쇄물에서 백색점은 본래의 백색보다 다소 떨어지는 색재현을 나타낸다. 상대 측색적 색재현은 색재현 안의 색상인 경우 가장 정확하게 재현할 수 있고, 색재현 밖의 색상인 경우 재현할 수 있는 색상의 가장 가까운 점에 있는 색상으로 맞춘다.

고채도 색재현 방식은 주관적, 물리적으로 정확성을 일치시키는 것과 달리 사람의 피부색이나 하늘, 잔디와 같은 물체의 색에서 선호하는 색으로 재현하기 위해 원고의 색과 현색적으로 다르게 재현하는 것이다. 정확한 색재현을 목표로 하는 컬러관리에서는 부적합한 방법이다.



Ⅲ. 실험

1. Sample target 및 선형화 패치제작

Figure 10과 같이 입력 장치의 캘리브레이션용 FUJI color input target IT 8.7/2과 GretagMacbeth Colorchecker DC chart, 모니터의 특성화에 필요한 매트릭스 제작을 위하여 gray 패치를 각각 제작하여 본 실험에 적용하였다. 또한 디지털 인쇄 장치의 특성화를 위하여 ECI2002 (ISO/CD 12642-X) Visual 1,485 패치를 이용하였다.

IT 8.7/2 target은 22개의 중성색 부분과 hue angle, 시각적으로 lightness와 chroma 영역을 균등하게 하여 제작한 144개의 영역, 84개인 C, M, Y, K, R, G, B 영역, 그리고 36개의 스킨 컬러 영역을 합쳐 총 286개의 패치로 구성되어 있다. 또한 linear target은 모니터에서 선형변환 계산에 활용할 3×3 매트릭스와 R, G, B 각 채널에서 장치의 입력값에 대한 응답특성을 분석하기 위하여 필요한 target이다. Linear target은 R, G, B 각각의 채널당 0에서 255레벨 사이를 4레벨 단계씩 65개로 총 195개 패치와 8레벨 단계씩 33개로 총 99개 패치와 gray 0에서 255레벨까지 33개와 65개의 패치로 제작하였다. ECI2002 target은 인쇄 장치의 특성화를 위한 ISO와 ANSI에서 정한 표준 target으로 실험에 가장 널리 사용되고 있다. ECI2002 target은 K0과 K20일 때, 각각 C, M, Y의 망점 면적율이 0, 10, 20, 40, 70, 100 단계의 조합으로 만든 $432(2 \times 6^3)$ 색, K40과 K60일 때 C, M, Y의 망점 면적율이 0, 20, 40, 70, 100단계의 조합으로 만든 $250(2 \times 5^3)$ 색, K80일 때 C, M, Y의 망점 면적율이 40, 70, 100단계의 조합으로 만든 $64(4^3)$ 색으로 합계

746색을 포함한다. 또한 기본 target 182개를 더하여 총 928색으로 구성된 IT8.7/3 target에서 부족한 C, M, Y 단계 729(9^3)색을 늘여 제작한 전체 패치의 수가 1,485개인 target이다.

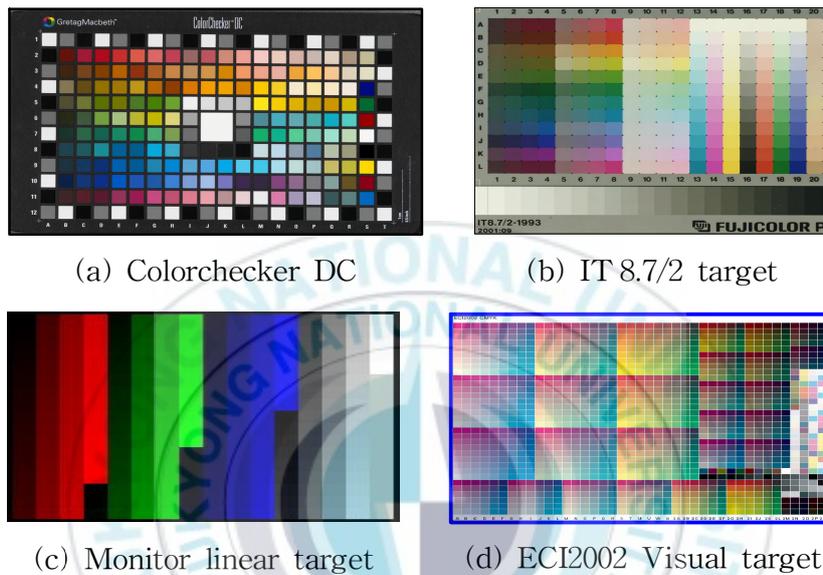


Figure 10. Test target for use in experiment [(a) Colorchecker DC (b) IT 8.7/2 target, (c) Monitor linear target, (d) ECI2002 Visual target].

2. 입력 장치의 색변환

가. 입력 장치의 gamma 보정

입력 장치로 입력된 GretagMacbeth Colorchecker DC chart 240개 patch의 RGB 값은 샘플의 부분적인 색오차를 줄이기 위하여 장치독립 색공간

인 CIELAB에서 가로, 세로 40 pixel로 샘플 이미지를 자른 후, Raw 파일 포맷으로 저장했다. 저장된 이미지는 Matlab 7.0 프로그램을 이용하여 patch의 평균 RGB 값을 구했고, OriginPro 7.0 프로그램을 이용하여 patch의 정규화된 RGB 값을 각각 구했다. 정규화된 RGB 값은 대수를 적용한 gamma 계산방법을 이용하여 Table 3과 같이 R, G, B 채널 각각의 gamma 값을 구하고, 계산된 gamma의 역수를 식 (29)의 정규화된 R, G, B에 지수로 적용함으로써 gamma 보정을 통해 비선형을 각각 선형화시켰다.

Table 3. Gamma Values of Input Device

Gamma Value Input Device	Gamma		
	R Channel	G Channel	B Channel
Scanner	2.13	2.16	2.18
Camera	2.14	2.17	2.19

$$\begin{aligned}
 R_{\gamma_{scanner}}(i) &= R_{nr}(i)^{(1/2.13)} \\
 G_{\gamma_{scanner}}(i) &= G_{nr}(i)^{(1/2.16)} \\
 B_{\gamma_{scanner}}(i) &= B_{nr}(i)^{(1/2.18)} \\
 R_{\gamma_{camera}}(i) &= R_{nr}(i)^{(1/2.14)} \\
 G_{\gamma_{camera}}(i) &= G_{nr}(i)^{(1/2.17)} \\
 B_{\gamma_{camera}}(i) &= B_{nr}(i)^{(1/2.19)}
 \end{aligned} \tag{29}$$

나. 입력 장치의 특성화

입력 장치의 특성화는 회귀분석을 이용하여 먼저 입력된 GretagMacbeth Colorchecker DC chart 240개 patch의 RGB 값을 측색된 XYZ 삼자극치의 상관관계로서 3×3 , 3×8 , 3×9 , 3×11 , 3×14 , 3×16 , 3×20 매트릭스를 계산하였다. 계산된 매트릭스 중 가장 색차가 적은 3×20 매트릭스를 식 (30)과 같이 RGB값에 곱하여 XYZ 삼자극치를 구하였다.

$$\begin{bmatrix} -0.1495 & 0.1454 & 0.0976 & 0.0594 & -0.0205 & -0.0039 & 0.0039 & -0.0033 & -0.0012 & -0.0005 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.1461 & 0.0596 & 0.2291 & 0.0982 & -0.0029 & -0.0023 & 0.0021 & -0.0023 & -0.0018 & -0.0005 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 \\ 0.7016 & -0.0169 & 0.0135 & 0.2695 & -0.0001 & -0.0004 & -0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{scanner} \\ G_{scanner} \\ B_{scanner} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{scanner} \\ Y_{scanner} \\ Z_{scanner} \end{pmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -0.4897 & 0.0522 & 0.0588 & -0.0156 & -0.0011 & -0.0001 & 0.0004 & 0.0005 & 0.0000 & 0.0005 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \\ -0.0240 & -0.0028 & 0.1675 & -0.0488 & -0.0021 & 0.0001 & 0.0008 & 0.0008 & -0.0025 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0000 \\ -0.5945 & -0.0316 & 0.0132 & 0.0265 & -0.0001 & -0.0005 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0004 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0000 & -0.0000 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} R_{camera} \\ G_{camera} \\ B_{camera} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{camera} \\ Y_{camera} \\ Z_{camera} \end{pmatrix} \quad (30)$$

단 여기서 $X/X_n > 0.008856$, $Y/Y_n > 0.008856$, $Z/Z_n > 0.008856$ 일 경우이며, 명도를 나타내는 L은 CIE 1976 명도지수(psychometric lightness)라 하고, X_n , Y_n , Z_n 은 완전 반사면의 삼자극치, X , Y , Z 는 삼자극치이다.

스캐너와 디지털 카메라의 색변환 결과를 평가하기 위하여 특성화 하지 않은 IT 8.7/2 target의 원고를 FUJI FILM FineScan 2750에서 200 ppi로 스캐닝하여 Raw 파일 포맷으로 저장하였다. 또한 target를 표준광원 D65 조건의 암실에서 Finepix S2pro 디지털 카메라로 촬영한 후 Raw 파일 포맷으로 저장하였다. 저장한 이미지는 Matlab 7.0 프로그램으로 각각의 target에 대한 RGB 평균값을 구하였다. 여기서 구한 RGB 값에 3×20 매트릭스를 적용하여 XYZ 삼자극치로 색변환하였고, 다시 XYZ를 식 (31)를 이용하여 LAB 값으로 변환하였다.

$$\begin{aligned}
L &= 116(Y/Y_n)^{1/3}-16 \\
A &= 500 [(X/X_n)^{1/3} - (Y/Y_n)^{1/3}] \\
B &= 200 [(Y/Y_n)^{1/3} - (Z/Z_n)^{1/3}]
\end{aligned}
\tag{31}$$

또한 원고인 IT 8.7/2 target의 CIELAB 값을 직접 GretagMacbeth사의 Spectrolino 측색기로 GretagMacbeth사의 Profilemaker 5.0 소프트웨어를 사용하여 측색하였다. 이때 측색 조건은 2도 시야에서 입력 장치의 환경과 동일하게 하기 위하여 D65를 기본으로 설정하였고, 측정치의 정확도를 높이기 위하여 세 번 측정 후 평균값을 구하였다. 그리고 Figure 11과 같이 계산한 CIELAB 값과 측색한 CIELAB 값으로 색차를 구하여 색변환 방법의 타당성을 검토하였다. 또한 계산된 값을 참조하여 ICC 프로파일로 저장하였다.

3. 출력 장치의 색변환

가. 모니터의 특성화

본 실험에 사용한 모니터 장치는 Samsung SyncMaster 917MB 17inch CRT 모니터와 EIZO FlexScan L568 LCD 모니터를 사용하였다. 모니터의 색변환 방법은 모니터 컬러 관리에 가장 일반적으로 사용되는 GOG, sRGB, 1D LUT와 선형보간법에 의한 색변환 모델을 선정하였다. 선행연구에 의하면 Figure 12, 13과 같이 모니터에서 4레벨 단계로 0 ~ 255까지 입력된 R, G, B 각각의 신호값에 대한 출력값 Y가 모두 비선형 응답특성을 나타내었으므로 모니터 특성화를 통해 선형화할 필요가 있다.

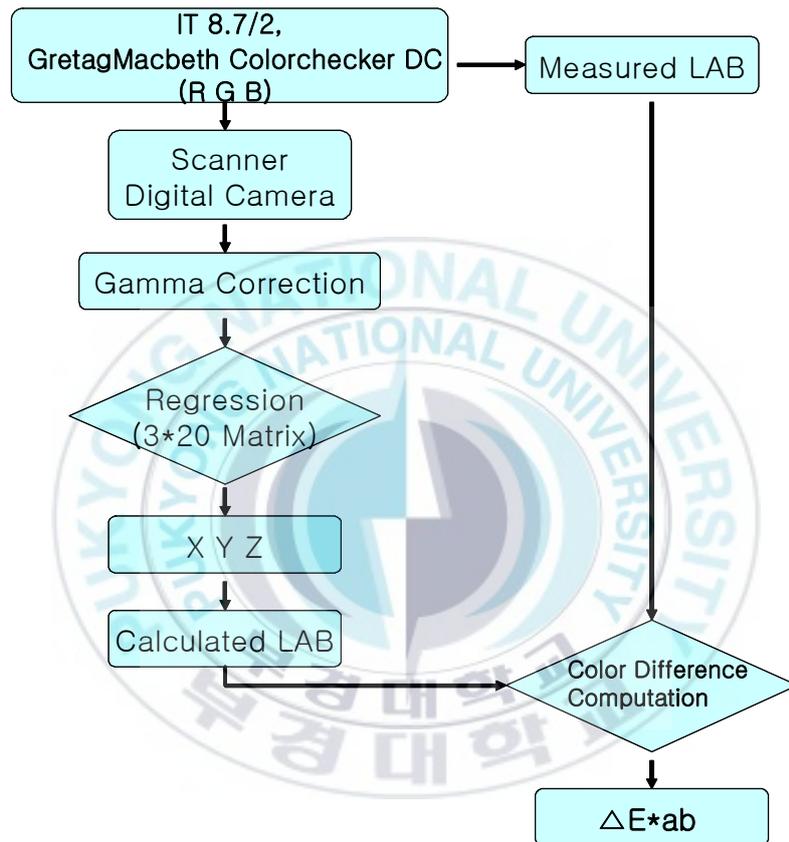
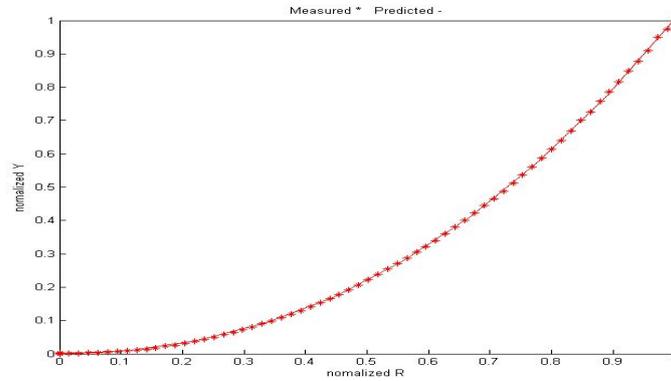
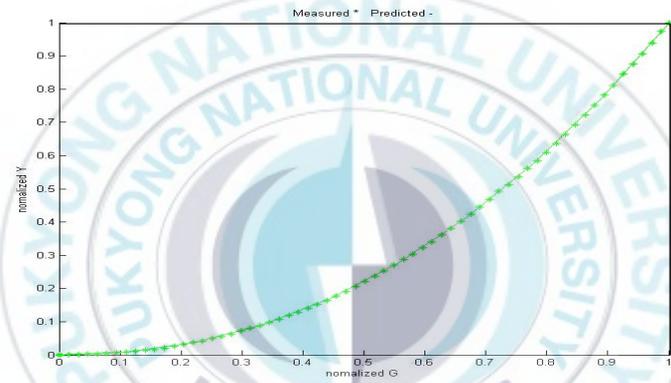


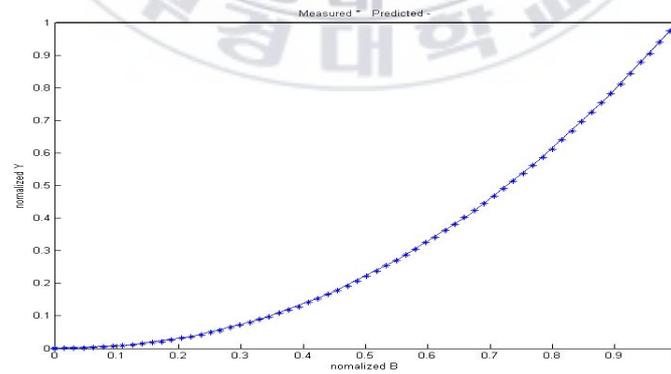
Figure 11. Input device RGB to LAB color transformation test method.



(a) R channel

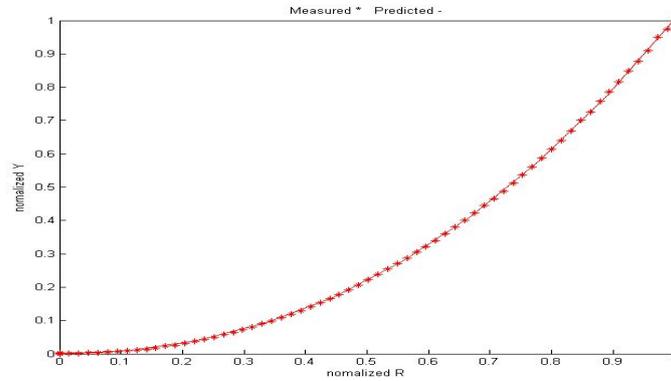


(b) G channel

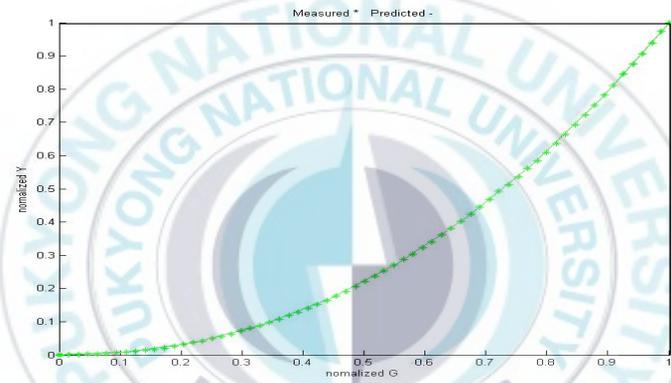


(c) B channel

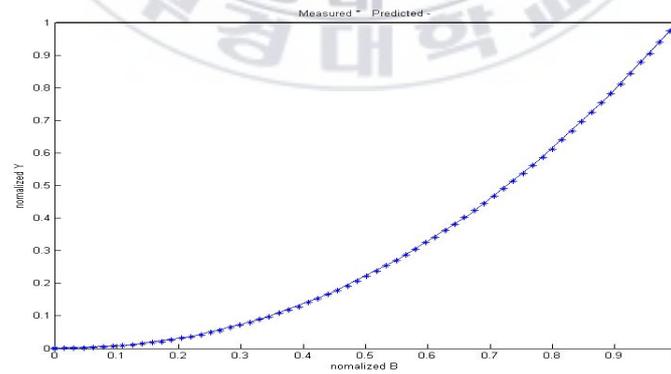
Figure 12. Non-linear response for input RGB value and output Y in CRT[(a) R channel, (b) G channel, (c) B channel].



(a) R channel



(b) G channel



(c) B channel

Figure 13. Non-linear response for input RGB value and output Y in LCD [(a) R channel, (b) G channel, (c) B channel].

모니터 특성화를 위한 캘리브레이션 조건은 표준 whit point가 6,500K, gamma 값은 2.2로 설정하였고, 또한 최대 밝기를 CRT는 80 cd/m^2 , LCD는 120 cd/m^2 으로 조정하였으며, contrast는 100, brightness는 50으로 각각 설정하였다. 모니터의 캘리브레이션에 사용된 소프트웨어는 GretagMacbeth사의 ProfileMaker 5.0이고, 측색에 사용된 장비는 GretagMacbeth의 Eye-One을 사용하였으며, 주변 광원에 의한 플레어를 최소화하기 위하여 암실 조건을 선택하여 측색하였다.

모니터 R, G, B 채널의 최대 입력값 255, 255, 255 레벨에서 삼자극치 XYZ를 측색하여 선형변환 계산에 활용한 3×3 매트릭스를 구하였다. 또한 각각 0에서 255레벨 사이를 4레벨 단계씩 65개 총 195개의 패치와 8레벨 단계씩 33개 총 99개의 패치를 각각 제작한 후 삼자극치 XYZ를 GretagMacbeth의 Eye-One로 측정하였다.

Table 4와 같이 측정된 값은 Matlab 7.0 프로그램에서 회귀분석을 통하여 GOG의 선형변환에 필요한 매개변수 gain, offset, gamma 값을 구하였다. 또한 여기서 구한 매개변수 중 CRT, LCD의 gain, offset, gamma 값을 식 (11)에 각각 대입하여 식 (32), (33)과 같이 RL, GL, BL을 계산하였고, 계산된 RL, GL, BL를 식 (34), (35)와 같이 3×3 매트릭스를 곱하여 XYZ로 선형 변환하였다. sRGB 색공간을 이용한 색변환은 먼저 식 (20)에서 RL, GL, BL을 계산하였고, 계산된 RL, GL, BL을 식 (36)에서 대입하여 3×3 매트릭스를 곱하여 삼자극치 XYZ로 선형 변환하였다.

LUT에 의한 변환 방법은 장치의 물리적 응답특성에 상관없이 색변환이 가능하므로 CRT나 LCD 모니터에 동일하게 적용할 수가 있고, 샘플링할 patch의 개수가 적절하다면 양호한 색변환 결과를 얻을 수 있다. LUT과 1차원 선형보간 방법을 사용하여 구한 3×3 매트릭스를 식 (37), (38)과 같이

곱하여 XYZ 값으로 변환하였다.

또한 XYZ 값을 이용한 역변환에서는 GOG 모델의 경우 먼저 역 3×3 매트릭스를 XYZ값에 곱하고 식 (39), (40)과 같이 GOG 모델에 gain, offset, gamma 값을 적용하여 RGB를 계산하였다. sRGB나 1D LUT를 이용한 역변환에서는 역 3×3 매트릭스를 구한 후, XYZ값에 각각 곱하여 각각 RGB 값을 얻었다.

Table 4. The Variable Values of GOG Model in CRT & LCD

Model	Monitor	Channel	Gain	Offset	Gamma
GOG	CRT	R	0.9890	0.0092	2.2417
		G	0.9951	0.0037	2.2027
		B	0.9932	0.0057	2.2017
	LCD	R	1.0049	-0.0040	2.1947
		G	1.0066	-0.0075	2.1879
		B	0.9947	0.0058	2.2794

$$\begin{aligned}
 RL_{CRT} &= \begin{cases} [0.9836 (\frac{d_r}{255}) + 0.0185]^{2.2547}, & [0.9836 (\frac{d_r}{255}) + 0.0185] \geq 0 \\ 0, & [0.9836 (\frac{d_r}{255}) + 0.0185] < 0 \end{cases} \\
 GL_{CRT} &= \begin{cases} [0.9953 (\frac{d_g}{255}) + 0.0041]^{2.1983}, & [0.9953 (\frac{d_g}{255}) + 0.0041] \geq 0 \\ 0, & [0.9953 (\frac{d_g}{255}) + 0.0041] < 0 \end{cases} \\
 BL_{CRT} &= \begin{cases} [0.9996 (\frac{d_b}{255}) + 0.00003]^{2.1844}, & [0.9996 (\frac{d_b}{255}) + 0.00003] \geq 0 \\ 0, & [0.9996 (\frac{d_b}{255}) + 0.00003] < 0 \end{cases}
 \end{aligned} \tag{32}$$

$$\begin{aligned}
RL_{LCD} &= \begin{cases} [1.0049(\frac{d_r}{255}) - 0.0040]^{2.194747}, & [1.0049(\frac{d_r}{255}) - 0.0040] \geq 0 \\ 0, & [1.0049(\frac{d_r}{255}) - 0.0040] < 0 \end{cases} \\
GL_{LCD} &= \begin{cases} [1.0066(\frac{d_g}{255}) - 0.0075]^{2.1983}, & [1.0066(\frac{d_g}{255}) - 0.0075] \geq 0 \\ 0, & [1.0066(\frac{d_g}{255}) - 0.0075] < 0 \end{cases} \quad (33)
\end{aligned}$$

$$BL_{LCD} = \begin{cases} [0.9947(\frac{d_b}{255}) + 0.0058]^{2.2794}, & [0.9947(\frac{d_b}{255}) + 0.0058] \geq 0 \\ 0, & [0.9947(\frac{d_b}{255}) + 0.0058] < 0 \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} X_{CRT} \\ Y_{CRT} \\ Z_{CRT} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.53431 & 0.4096 & 0.2010 \\ 0.2754 & 0.8392 & 0.0967 \\ 0.0165 & 0.1596 & 1.1035 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$\begin{pmatrix} X_{LCD} \\ Y_{LCD} \\ Z_{LCD} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.3347 & 0.2823 & 0.1452 \\ 0.1734 & 0.5601 & 0.0683 \\ 0.0191 & 0.0956 & 0.7561 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{pmatrix} \quad (35)$$

$$\begin{pmatrix} X_{sRGB} \\ Y_{sRGB} \\ Z_{sRGB} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.5303 & 0.4063 & 0.2080 \\ 0.2739 & 0.8234 & 10.39 \\ 0.0129 & 0.1528 & 1.1541 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{pmatrix} \quad (36)$$

$$\begin{pmatrix} X_{CRT_{1DLUT}} \\ Y_{CRT_{1DLUT}} \\ Z_{CRT_{1DLUT}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3536 & 0.1798 \\ 0.2127 & 0.6982 & 0.0845 \\ 0.0221 & 0.1204 & 0.9410 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{pmatrix} \quad (37)$$

$$\begin{pmatrix} X_{LCD_{1DLUT}} \\ Y_{LCD_{1DLUT}} \\ Z_{LCD_{1DLUT}} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4124 & 0.3576 & 0.1805 \\ 0.2126 & 0.7152 & 0.0722 \\ 0.0193 & 0.1192 & 0.9505 \end{bmatrix} \times \begin{pmatrix} RL \\ GL \\ BL \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$\begin{aligned}
R_{CRT} &= \left(\frac{255}{0.9836}\right) \left[\left(\frac{RL}{255}\right)^{1/2.2547} - 0.0185\right] \\
G_{CRT} &= \left(\frac{255}{0.9953}\right) \left[\left(\frac{GL}{255}\right)^{1/2.1983} - 0.0041\right] \quad (39)
\end{aligned}$$

$$B_{CRT} = \left(\frac{255}{0.9996}\right) \left[\left(\frac{BL}{255}\right)^{1/2.1844} - 0.00003\right]$$

$$\begin{aligned}
R_{LCD} &= \left(\frac{255}{1.0029}\right) \left[\left(\frac{RL}{255}\right)^{1/2.1997} + 0.0061\right] \\
G_{LCD} &= \left(\frac{255}{1.0054}\right) \left[\left(\frac{GL}{255}\right)^{1/2.1917} + 0.0087\right] \quad (40)
\end{aligned}$$

$$B_{LCD} = \left(\frac{255}{0.9937}\right) \left[\left(\frac{BL}{255}\right)^{1/2.2190} - 0.0068\right]$$

또한 모니터에서 색변환 결과를 평가하기 위하여 특성화 하지 않은 IT 8.7/2 target의 원고를 FUJI FILM FineScan 2750에서 200 ppi로 스캐닝하여 Raw 파일 포맷으로 저장하였다. 저장한 이미지는 Matlab 7.0 프로그램으로 각각의 target에 대한 RGB 평균값을 구한 후 CRT, LCD 모니터의 GretagMachbeth사의 Profile Maker 5.0 소프트웨어를 사용하여 디스플레이한 후 모니터 측색기를 이용하여 측색하였다.

Figure 14와 같이 IT 8.7/2 target를 측색하여 얻은 LAB와 target에 Table 4의 매개변수를 적용하여 선형 변환한 GOG 모델과 3×3 매트릭스를 곱하여 선형 변환한 sRGB 모델 및 1차원 선형보간 방법을 각각 적용한 후 얻은 LAB와의 차를 구하였다. 또한 Figure 14와 같이 역변환을 수행하여 각각 계산된 RGB값을 모니터 측색기로 측정하였고, 원고 target의 LAB값과 변환하여 얻은 LAB 사이의 ΔE^*_{ab} 를 구하여 비교 평가하였으며, 변환된 값을 참조하여 ICC 프로파일을 제작하였다.

나. 디지털 인쇄기의 특성화

디지털 인쇄기의 정확한 컬러 재현을 얻기 위하여 캘리브레이션 단계로 장치에 맞는 선형화 CMYK 값을 구하였다. CMYK의 선형화 값을 찾기 위하여 토털 잉크 한계(TIL, total ink limit)값을 알아야 하며, TIL 설정은 CMYK를 각각 25%에서 100%로, 잉크함량 100%에서 400%까지 순차적으로 증가시키면서 출력하였다. 본 실험에서는 TIL 한계값을 구한 결과 220%였고, 또한 CMYK 각각의 잉크 한계값을 구한 결과 C 46%, M 37%,

Y 37%, K 100%이었다. 이 값을 CIELAB값에서 CMYK값으로 변환될 때 프린터 장비에서 각각 100% 인식되도록 하였다. 출력 장치를 선형화한 후 중간 광택의 250g/m² 전용지에 Roland사의 Linearization Pattern (dpt32.ps) target를 출력한 후 CMYK의 단계별 농도값의 변화와 색차를 비교하여 캘리브레이션 결과를 확인하였다. 실험에 사용한 디지털 인쇄 장치는 Roland사의 FJ740 Digital Printing System인 용제 안료형 잉크젯 방식이고, 독립된 소프트웨어 립을 통해 인쇄가 이루어졌다.

또한 본 연구에서는 Figure 15와 같은 과정으로 임의의 11×11×11개인 총 1,331개의 패치로 LUT를 제작하였고, Figure 16와 같이 ECI2002 Visual target의 1,485개의 패치 중 CMY에서 LAB로 색변환할 때 총 729개를 사용하였다. 이때 색변환 방법은 3차원 선형 보간법을 적용하였다. 선형 보간방법에 의한 색변환 결과를 평가하기 위하여 ECI2002 Visual target CMY로 구성된 729개의 패치를 미리 인쇄한 후 CIELAB값을 측색하였으며, 동일한 컬러 패치를 사용하여 CMY에서 CIELAB로 색변환 후 계산된 CIELAB값과 실측한 CIELAB값 사이의 색차를 비교하여 3차원 선형 보간방법의 효용성을 검토하였다.

또한 Figure 17과 같이 CIELAB 공간에서 CMY로 색변환하기 위해 LUT과 4면체 보간법을 사용하였다. 먼저 입력 패치를 사용하여 CMY-LAB로 4면체를 구성하였고, LAB-CMY LUT를 구성하기 위해 11×11×11개인 총 1,331개의 LAB값을 입력한 후 입력된 LAB값을 전체 4면체에서 포함하는 여부를 판별한 후 4면체 보간법으로 CMY를 각각 계산하였다. 계산된 값을 참조하여 ICC 프로파일을 제작하였다.

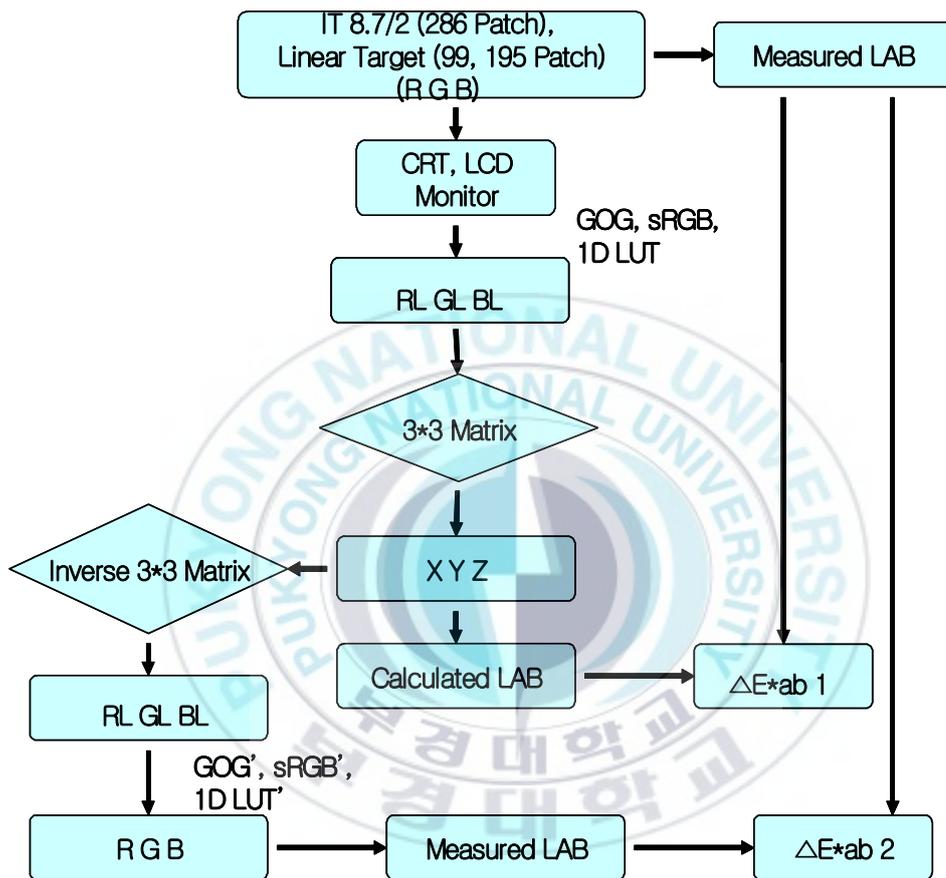


Figure 14. The color transformation test of output device(monitor).

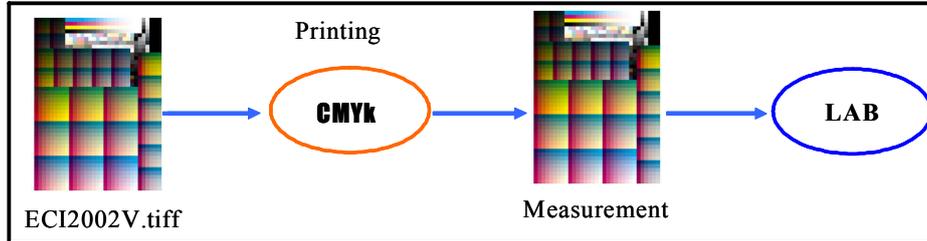


Figure 15. Production process of initial LUT.

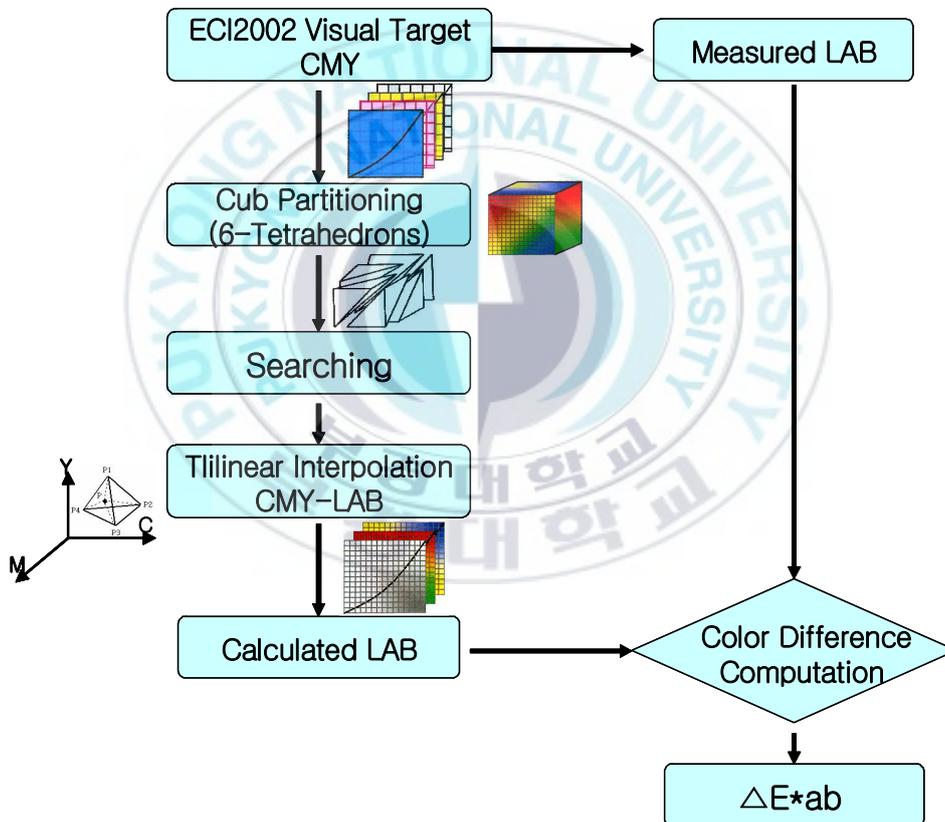


Figure 16. Schematic diagram for CMYK to CIELAB color transformation.

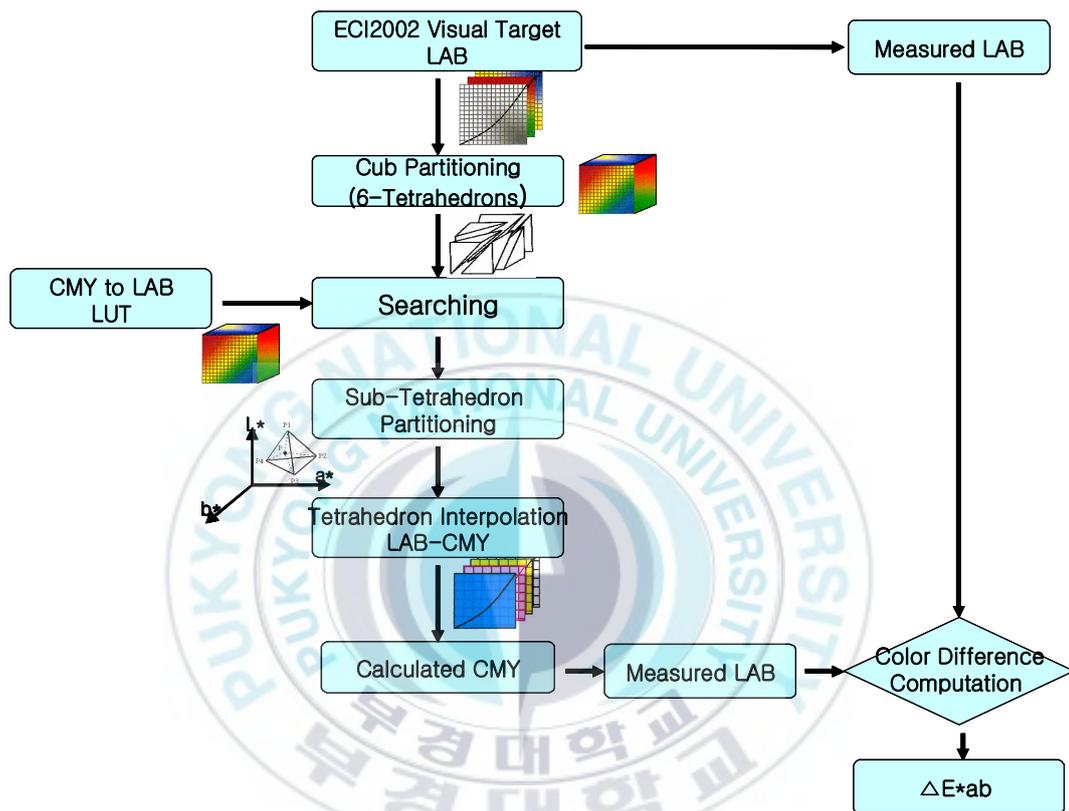


Figure 17. Schematic diagram for CIELAB to CMYK color transformation.

4. GCR(gray component replacement)방법을 이용한 회색보정

일반적으로 인쇄에서 CMY로 색변환한 후 회색의 단계별 재현 상태를 확인하면 중성회색으로 재현되지 못하고, CMY의 특정 색상에 치우치는 컬러 캐스트가 발생하였다. 본 실험에서 명도축에 선형화시키는 방법으로 CIELAB 색공간을 이용하여 A와 B값은 0으로 고정시키고, L값을 0에서 100까지 5 단계씩 증가시켜 20개의 회색을 출력 장치의 결과물을 참조하여 제작된 LUT과 3차원 보간법으로 LAB값을 CMY값으로 계산하였다. 계산된 값을 재현한 결과 Fig 18(a)와 같이 전체적으로 갈색의 회색이 재현됨을 알 수 있다. 특히 사람은 시지각 시스템의 특성상 회색의 차이에 매우 민감하게 반응하므로 이러한 갈색의 회색은 CMY 부분을 포함한 재현물의 전체 범위에 걸쳐서 Figure 18(b)와 같이 중성회색으로 대체시키는 회색보정이 필요하다.³⁹⁾

따라서 본 실험에서는 C, M, Y의 유채색 부분을 포함한 색재현의 전체 범위에 걸쳐 회색보정이 이루어지는 black generation 방법 중 GCR 방법을 선택하여 K를 대체시켰다.^{40,41)} 또한 GCR 적용방법은 가장 적절한 중성회색을 찾기 위하여 C, M, Y잉크 양을 토털 한계 잉크값에 기초하여 네 단계로 나누어 줄였고, 줄여진 양만큼 K로 대체시켰다. 이 때 GCR의 양은 제거된 3차색의 백분율로 정의되며, 100%를 초과할 수 없다.

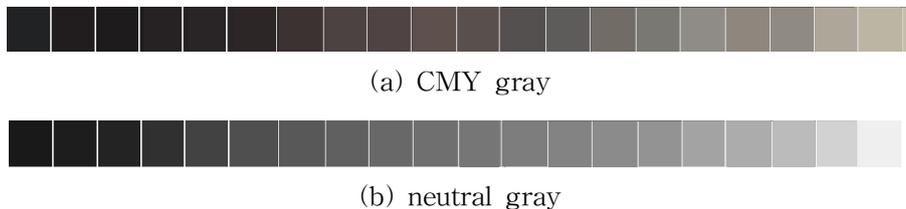


Figure 18. Gray generated by CMY and neutral gray.

5. 색역 사상의 적용

ICC에서 기본적으로 제시하는 색역 사상방법은 perceptual, relative, saturation, absolute rendering intent 등 4가지가 있다.³⁸⁾

본 실험에서는 4가지 색역 사상의 특성을 파악하기 위하여 모두 적용하여 인쇄한 후 측색하여 색차를 구하였다. 특히 색역을 사상함에 따라 화상의 콘트라스트가 감소하는 단점을 보완할 수 있는 saturation rendering intent방법을 사용하였으며, perceptual rendering Intent를 위해 gamut compression방법을 사용하였다. 또한 colorimetric rendering intent를 위해서 3차원 공간에서 최소 색차법을 이용한 방법을 적용하였으며, absolute colorimetric intent를 위해서는 색 변환과정에서 종이의 white point를 고려한 결과와 고려하지 않은 결과를 비교 검토하였다.

6. 디지털 인쇄의 컬러 재현

장치별 프로파일 제작에는 매트릭스를 기본으로 하여 색변환하는 방법과 LUT를 기본으로 하여 색변환하는 방법이 있다. 본 논문에서는 두 가지 방법을 모두 수행한 후 결과가 더 양호한 쪽을 선택한 후 입력 장치에서 출력 장치까지 색변환하여 프로파일 제작에 참조하였다.

Figure 19와 같이 장치의존 색공간에서 장치독립 색공간으로 색변환하는 정변환(A to B)으로 입력 장치는 다중회귀분석으로 구한 3×20 의 매트릭스를 곱하여 변환된 XYZ 삼자극치를 LAB값으로 변환하여 프로파일에 참조하였고, 출력 장치는 역변환(B to A)으로 모니터에서 장치독립 색공간인

XYZ값을 역변환 매트릭스 3×3을 곱하고, 또한 색차가 가장 적은 역 GOG 모델을 선택하여 색변환된 RGB를 측색한 LAB값을 모니터 프로파일 제작에 사용하였다.

출력 장치가 인쇄기인 경우는 LAB값을 LUT과 4면체 보간으로 CMY를 계산하고, 이것을 측색한 LAB값을 ICC 프로파일 제작에 적용하였다. 이 때 ICC에서 기본으로 제시하는 색재현을 고려하여 색역을 압축하는 방법으로 perceptual, relative, saturation, absolute rendering intent 등 네 가지를 사용하였고, 색역사상 방법으로 세 가지를 적용하였다. 또한 회색 보정에서는 black generation 방법 중 GCR를 적용하여 LAB값에서 명도 L값과 A, B값의 변화량으로 회색의 보정이 이루어지도록 하였다. 이 때 세부적인 변수로 그레이 밸런스는 종이의 색을 회색으로 처리하는 것과 일반적인 중성회색에 기초로 하는 것으로 각각 나누어 인쇄 프로파일 제작에 적용하였다.

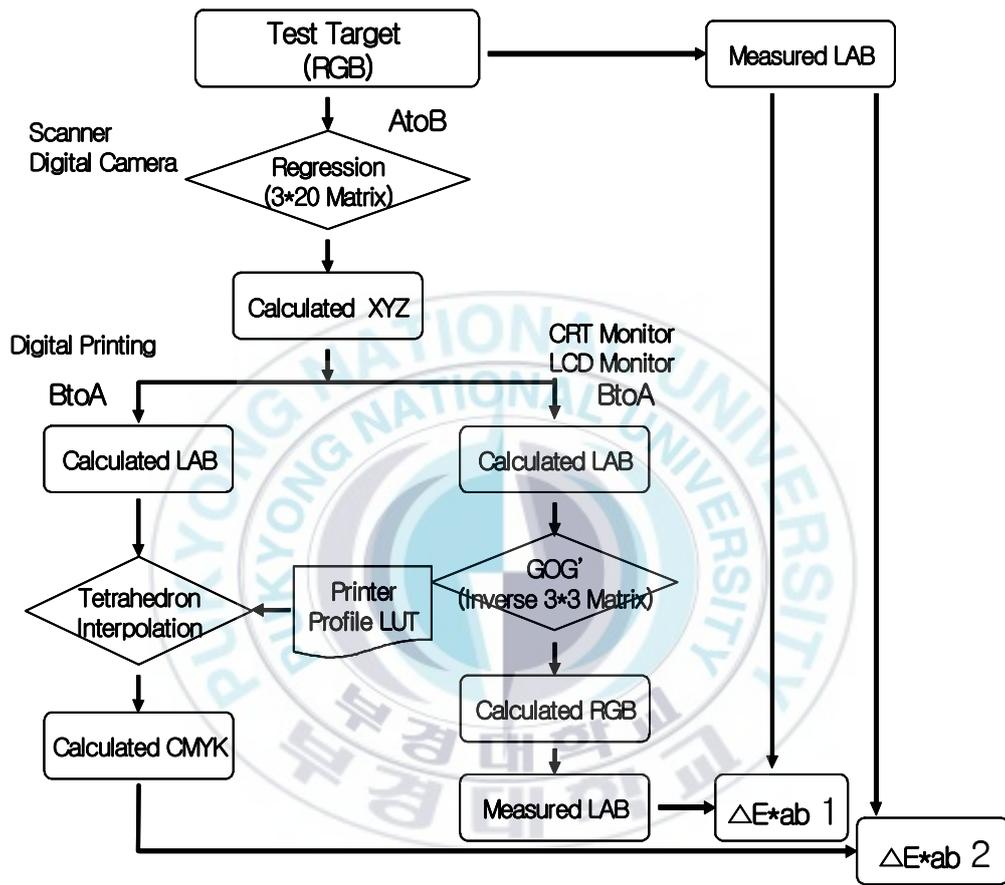


Figure 19. The color transformation from input device to output device.

IV. 결과 및 고찰

1. 입력 장치의 gamma 보정

색채과학 분야에서는 R, G, B 각 채널의 강도와 Y와의 관계가 선형관계인 것으로 알려져 있다. 그러나 인간의 시각 시스템의 색공간에서 컬러 패치로 구성된 GretagMacbeth Colorchecker DC chart와 IT 8.7/2 target에서 24개의 gray 패치를 입력 장치를 통해 입력된 R, G, B 각 채널에 대한 Y값을 구한 결과 Figure 20과 같이 비선형을 나타내었다. 즉 R, G, B 각 채널의 전압과 Y가 동일한 값을 응답하도록 부하하였지만 의도하는 것과는 달리 Y값이 아래로 쳐져서 나타난 결과이다. 특히 디지털 카메라와 스캐너의 Y값이 중간톤 영역에서 어두운 영역이나 밝은 영역보다 상대적으로 비선형의 정도가 더욱 심하여 어둡게 나타남으로서 비선형의 정도가 상대적으로 다른 영역보다 가중되었다. 이러한 현상은 이미지의 색재현에 왜곡을 수반하게 되므로 gamma 보정이 이루어져야만 한다. Gamma 보정은 먼저 R, G, B 값을 보편화된 데이터로 정규화하고, 정규화된 R, G, B 각 채널의 지수에 역수를 적용함으로써 Y값의 응답곡선이 위쪽으로 형성되도록 Figure 20, 21과 같이 수행되었다. 이러한 gamma 보정은 미리 R, G, B 채널에 전압을 정상적인 양보다 더 많이 부하함으로써, 응답하는 Y와 비선형이 선형화가 될 수 있도록 하는 것이다. Figure 20, 21과 같이 디지털 카메라와 스캐너가 R, G, B 채널에서 gamma 보정 후 Y값과의 관계가 gamma 보정전의 역으로 비선형 곡선을 나타내었다. 따라서 gamma 보정의 결과는 최종적으로 Y와 R, G, B 각 채널의 강도 사이에 선형적으로 매칭되어 입력 장치에서 최적의 그레이 밸런스가 유지되므로 특성화를 위한 데이터 제작에 오차를 줄일 수 있을 것이라 사료된다.

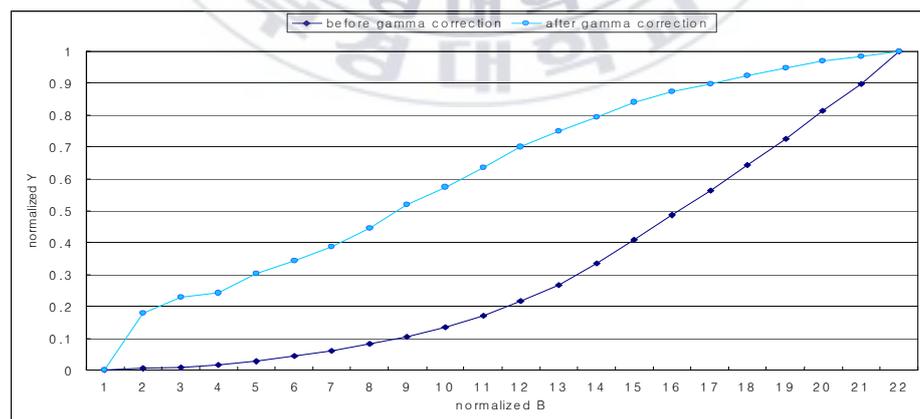
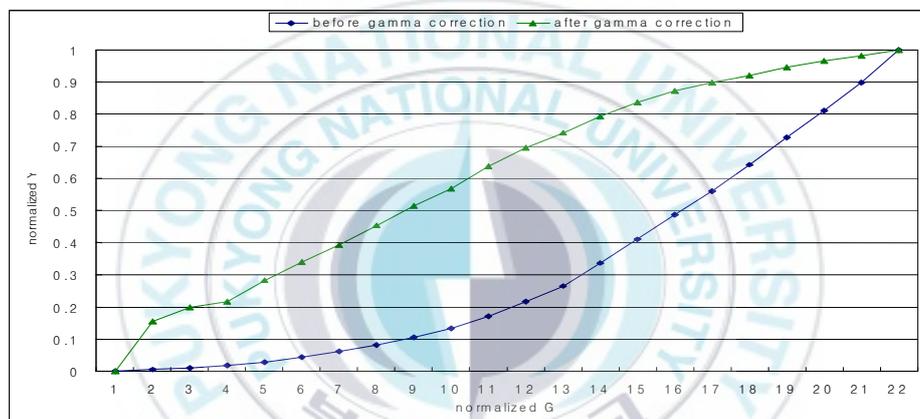
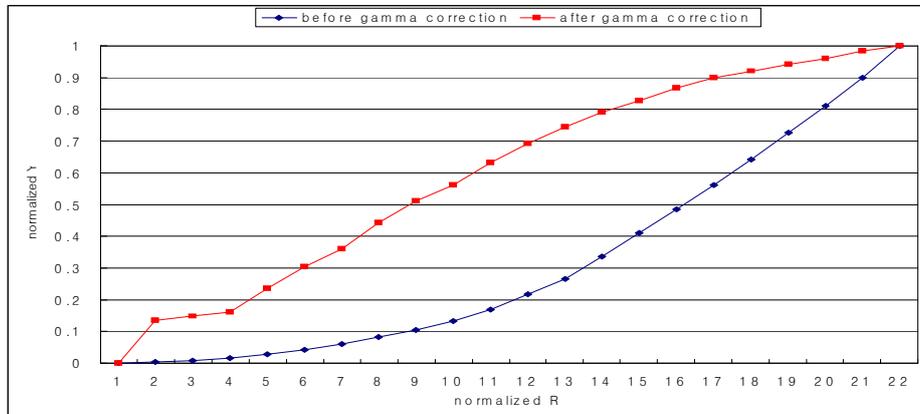


Figure 20. The gamma correction result of digital still camera.

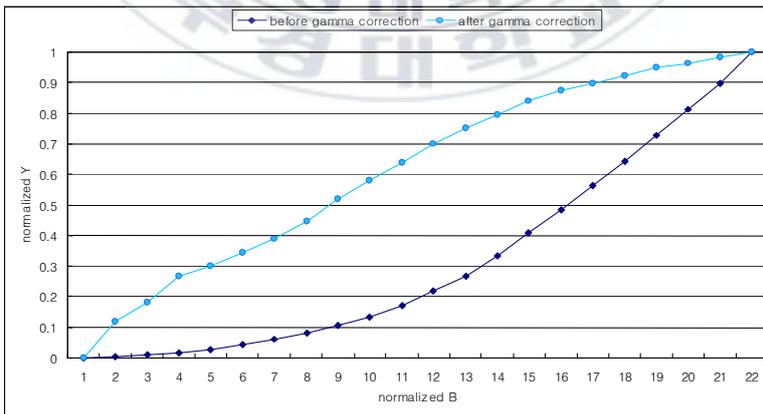
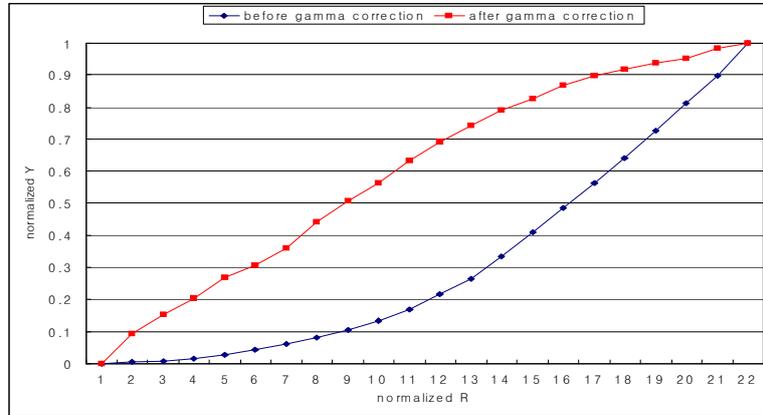


Figure 21. The gamma correction result of scanner.

2. 입력 장치의 색변환

ΔE^*_{ab94} 는 1993년 Berns에 의해 새롭게 제안된 CMC 색차를 기본으로 한 CIELCh의 공간을 이용하여 색차를 계산하였다. Table 5와 같이 스캐너는 0.7142, 디지털 카메라는 1.5144로 스캐너가 디지털 카메라보다 색변환에서 더 양호한 결과를 나타내었다. 이것은 입력 장치를 통해 입력된 종속 변수 R, G, B 값을 기본으로 하여 독립변수 XYZ 삼차극치를 계산하기 때문이라 사료된다.

또한 1980년 McDonald가 두 가지 색 사이에서 발생하는 색차를 hue-angle 종속 가중함수(hue-angle dependent weighting function)를 사용함으로써 보정할 수 있었고,⁴²⁻⁴⁵⁾ 2000년 Hong의 연구를 토대로 입력 장치를 통하여 입력된 원고의 CIELAB 값으로 lightness, chroma, hue-angle 평균차를 계산할 수 있었는데 그 결과는 Table 5와 같았다.

Table 5. Results for Linear Multiple Regression Method in Input Device

Method	Input Device	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{ab}	ΔE^*_{ab}	ΔL	ΔC	Δh
		94Avg.	Max.	Min.			
Linear Multiple Regression	Scanner	0.7142	10.4466	0.1231	0.4201	0.6446	2.0617
	Digital Camera	1.5144	17.2752	0.17608	1.1533	1.2742	1.9485

Table 5와 같이 스캐너인 경우 lightness 차이가 0.4201, 디지털 카메라인 경우 1.1533으로 스캐너가 보다 낮은 차이를 나타내었다. 또한 chroma

차이에서도 스캐너가 0.6446, 디지털 카메라가 1.2742로 역시 스캐너가 디지털 카메라보다 색변환에서 chroma 재현이 양호하였다. Hue-angle의 경우 스캐너가 2.0617, 디지털 카메라가 1.9485로 스캐너에서 hue-angle의 차이가 더 높게 나타났다.

따라서 스캐너의 색차는 lightness, chroma보다 hue-angle 차이에 가중되어 나타났지만, 디지털 카메라는 lightness, chroma, hue-angle 차이에 모두 가중되어 색차가 발생함을 알 수 있었다.

또한 스캐너와 디지털 카메라를 3×20 의 매트릭스로 R, G, B를 XYZ 삼자극치로 색변환하고, 다시 XYZ 삼자극치를 LAB값으로 변환했을 때 Figure 22, 23과 같은 결과를 얻었다.

Figure 22(a)와 같이 히스토그램에서 색차의 빈도수가 스캐너인 경우 대부분의 패치가 3이하의 색차를 나타내었지만, Figure 23(a)와 같이 디지털 카메라인 경우 5이상의 색차가 나는 패치도 많음을 알 수 있었다. 이것은 스캐너와 디지털 카메라가 모두 CCD 입력 센스를 기반으로 하지만, 스캐너인 경우 일정하게 고정된 광원을 사용하였고, 또한 스캔시 원고를 원고대 표면에 완전히 밀착 처리함으로써 균일하게 광원이 target 원고에 조사되었기 때문에 원고와의 색차가 적게 발생하였다.

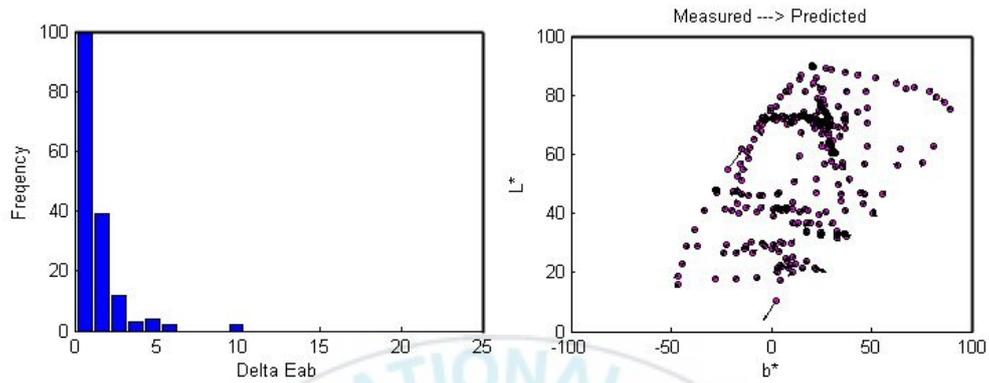
하지만 디지털 카메라인 경우 장치 외부에서 일정한 거리를 유지하고 광원을 조사하여 원고에서 반사된 광원만 렌즈를 통하여 입력되어 기록하기 때문에 따라서 조사된 광원이 전체 원고에 균일하게 반사되지 못함으로써 그 결과 원고와의 색차가 크게 발생한 것이라 사료된다. 또한 디지털 카메라가 스캐너보다 RGB와 CIEXYZ가 선형적 특성이 더 적기 때문이라 사료된다.

색변환된 패치의 경향을 알기 위하여 CIELAB 색공간에서 평가한 결과 스캐너의 경우 Figure 22와 같이 특정 패치를 제외한 대부분의 패치가 CIELAB 색공간에서 유사한 위치에 존재함으로써 색변환의 양호한 결과를 확인하였다.

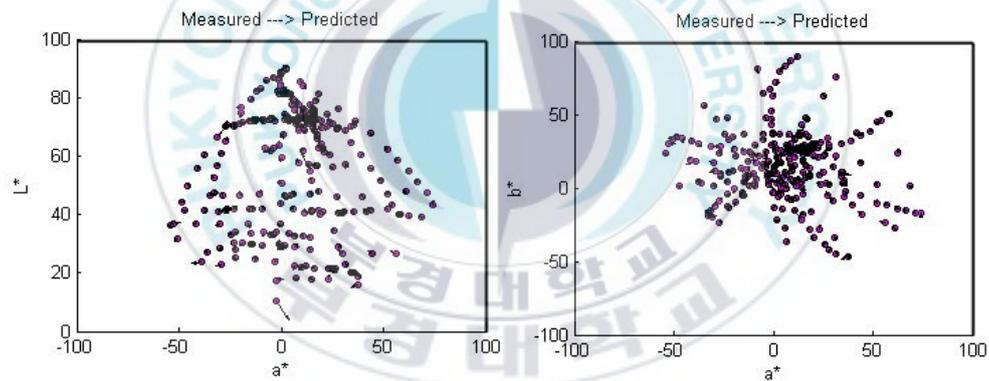
그러나 디지털 카메라의 경우 Figure 23(b)와 같이 b^* +쪽의 색은 색변환 후 원고와 비교하여 L^* 값이 증가하고, -쪽의 색은 감소하는 경향을 나타내었다. 이것은 B 채널의 휘도가 G 채널보다 낮기 때문에 입력된 색이 왜곡(distortion)되어 재현된 것이라 사료된다.

또한 a^* 공간의 경우 Figure 23(c)처럼 몇몇 패치를 제외한 대부분의 색은 L^* 값이 입력되는 원고의 값보다 증가하였는데 이것은 디지털 카메라의 R, G 채널의 기록휘도가 입력값보다 높은 결과라 사료된다. Figure 23(d)와 같이 디지털 카메라의 특성상 a^* 공간에 존재하는 색이 b^* 공간에 존재하는 색보다 재현성이 떨어졌다.



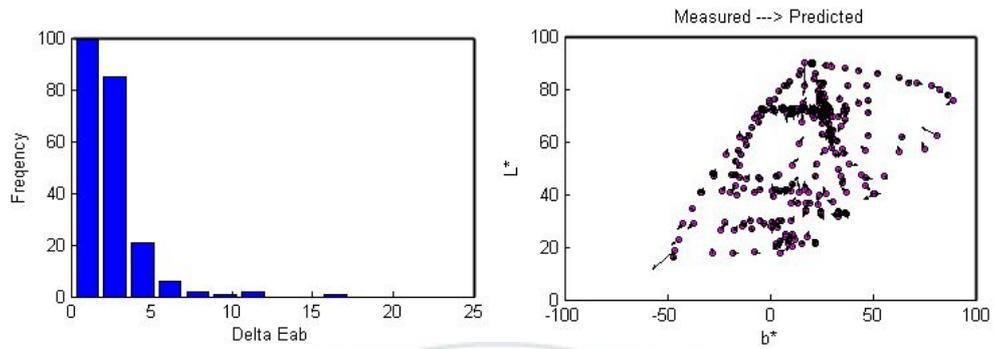


(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to calculated L^*b^*

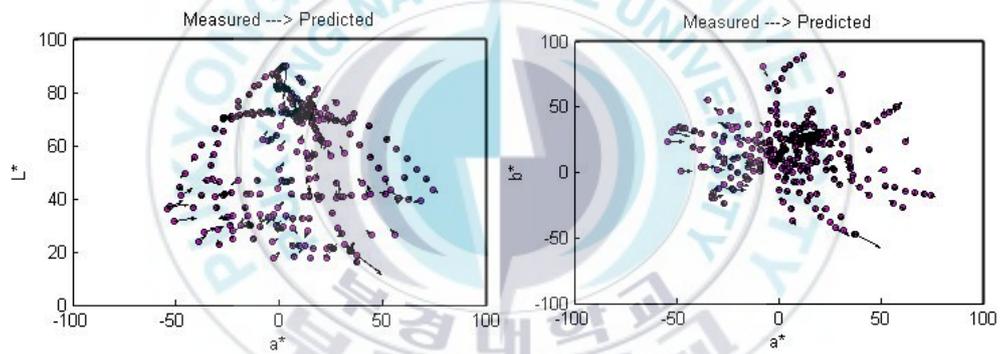


(c) original L^*a^* to calculated L^*a^* (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*

Figure 22. Color transformation results by linear multiple regression in scanner [(a) color difference histogram CIELAB, (b) original L^*b^* to calculated L^*b^* , (c) original L^*a^* to calculated L^*a^* , (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*].



(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to calculated L^*b^*



(c) original L^*a^* to calculated L^*a^* (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*

Figure 23. Color transformation results by linear multiple regression in digital still camera [(a) color difference histogram CIELAB, (b) original L^*b^* to calculated L^*b^* , (c) original L^*a^* to calculated L^*a^* , (d) original a^*b^* to calculated a^*b^*].

3. 모니터의 색변환

가. 모니터의 색재현 영역

본 연구에서 사용한 LCD와 CRT 모니터의 색재현 영역을 확인하기 위하여 R, G, B 채널의 최고 레벨값 255에서 모니터 측색기로 측색하여 LAB 값을 구한 결과 Figure 24와 같았다.

모니터 장치는 재현할 수 있는 색역이 클수록 정확도 레벨은 더 높아지고, 또한 더 많은 색을 디스플레이 할 수 있으며, CIEL*a*b* 색공간에서 원색을 나타낼 경우 각각 a*와 b*축에 존재한다. 그러나 표준 whit point 6,500K, gamma 2.2, contrast 100, brightness 50으로 캘리브레이션이 이루어진 LCD와 CRT 모니터이지만 Figure 24와 같이 R, G, B가 a*와 b*축에 존재하지 않고, 축과 축 사이에 위치함을 알 수 있다. 이것은 모니터의 기본 원칙인 각각의 채널이 독립적으로 색을 재현하지 못하고, 디스플레이 되는 과정에서 서로 혼색되어 나타난 결과라 사료된다. 또한 이러한 결과가 각각의 채널에 주어진 R, G, B값의 일관성을 유지할 수 없으므로 정확한 모니터의 특성화에 영향을 줄 것이라 생각된다.

LCD와 CRT 모니터는 -a*과 -b*축 사이에 존재하는 영역의 색재현이 다른 영역보다 상대적으로 부족한 경향을 나타내었다. 그러나 LCD 모니터는 CRT 모니터보다 saturation이 더 높게 나타났으며, a*축에서는 전체적으로 b*축에서는 +쪽의 색재현 영역이 더 넓어 색변환시 정확도가 향상됨으로서 장치간의 색차를 더 많이 줄일 수 있을 것이라 사료된다.

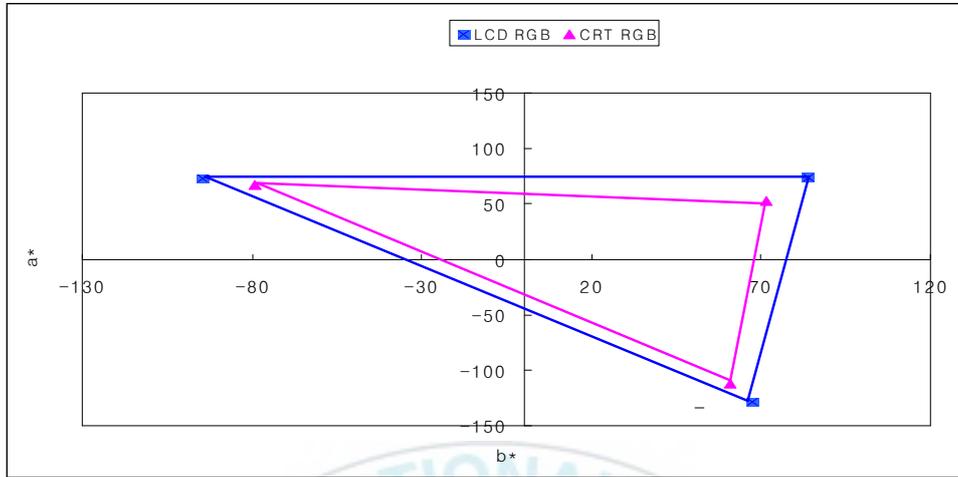


Figure 24. Comparison of color gamut of LCD and CRT monitor.

나. 모니터의 색변환

모니터의 특성화는 R, G, B 채널당 4레벨 단계로 0에서 255레벨까지 65개씩 총 195개의 패치를 적용하여 얻어진 톤 재현 곡선과 R, G, B 형광체의 최대 입력신호에 대한 삼자극치를 D_{65} 광원의 2도시야 조건에서 측색하여 선형변환에 필요한 변환 매트릭스로 나타낼 수 있다. 톤 재현 곡선은 입력 신호와 출력 휘도와의 비선형 관계를 선형으로 보정하는데 이용되고, 이러한 보정에 사용되는 매개변수 gain, offset, gamma를 구하고, 이 매개변수를 GOG 모델에 적용하여 색변환하였다.

Table 6과 같이 Linear target인 경우 LCD에서 색차가 0.7010이고, CRT는 0.2957로 LCD보다 적은 색차를 보였다. 이것은 LCD의 경우 비선형 변환 단계에서 간단한 지수함수로 일반화된 특성화에서는 입력 신호에 대한 응답 특성의 변화가 심할 경우 부적절하기 때문이라 사료된다. 그러나 IT 8.7/2 target의 경우는 LCD가 0.5402, CRT는 0.6697로 LCD가 CRT보다

색차가 적게 나타났다. 이것은 LCD 모니터가 R, G, B 신호값의 가색 혼합성이 우수하므로 선형 수식변환에서 오차가 작아져 색재현이 CRT 모니터보다 향상된 것이라 사료된다.

또한 CIE가 정한 sRGB 색공간은 다른 종류의 색공간에 비해 훨씬 적은 색영역을 가지므로 최선의 선택은 아니고, 치명적이지 않은 다소간의 손실을 인정하여 선택하는 보편적 의미가 큰 장치 독립적인 색공간이다. sRGB 색공간을 이용한 색변환 방법은 195개의 패치를 색변환 효용성과 색변환에서 나타나는 색차를 알기 위하여 GretagMacbeth spectrophotometer Eye-One로 측정하였다. 측정된 R, G, B 입력 신호값에 대한 출력 휘도 특성곡선에 회귀분석을 적용하여 매개변수를 계산하였다. 여기서 구한 매개변수와 R, G, B 채널의 255 레벨에서 측정한 XYZ 값을 선형적 변환 매트릭스로 이용하여 색변환하였다. 선행 연구에서 sRGB에 적용하여 색변환한 후 각각의 색차를 구한 결과 Table 6과 같았다. Linear target인 경우 LCD에서 4.4376, CRT에서 4.7493으로 LCD 모니터가 더 적은 색차를 나타내었다. IT 8.7/2 target의 경우 LCD에서 8.3632, CRT에서 7.7671로 sRGB 색공간을 이용한 색변환에서는 LCD, CRT 모니터에서 7이상의 색차를 나타내었다. 이것은 sRGB 색공간 적용에서 색변환시 기준 가시 환경에 대한 정의와 표준 장치계의 측색적 정의 등 제한된 조건에 따른 결과라 사료된다.

모니터에서의 색변환은 gamma 보정단계에서 비선형 응답특성 보정을 한 후 가산혼합 법칙을 기반으로 선형 수식변환을 하는 2단계 변환으로 이루어진다. LUT에 의한 색변환 방법은 장치의 물리적 응답특성에 상관없이 색변환이 가능하므로 CRT나 LCD 모니터의 선형변환 단계에서 동일한 매트릭스를 적용할 수 있어 모니터의 비선형 응답특성의 보정효과가 우수하다. 또한 모니터에서 샘플링할 패치의 개수가 적절하다면 양호한 색변환 결과를 얻을 수 있다. Table 6과 같이 linear target인 경우 LCD는 0.9789,

CRT는 0.6072로 1이하의 양호한 결과를 나타내었으며, IT 8.7/2 target의 경우 LCD에서 0.7847, CRT에서 0.7915의 색차를 각각 보였다. 전체적으로 LCD가 CRT보다 더 적은 색차를 나타내었는데 이것은 LCD 모니터가 R, G, B 신호값의 가색 혼합성이 우수하므로 선형 수식변환에서 오차가 작아져 색재현이 CRT 모니터 보다 향상된 것이라 사료된다.

따라서 GOG 모델을 적용한 색변환에서 가장 양호한 결과를 나타내었는데 이것은 특성화 과정에서 비선형 관계의 원인인 γ 매개변수에 gain과 offset 매개변수를 추가로 계산함으로써 정확성을 높일 수 있다. 뿐만 아니라 최고조의 R, G, B와 적은 샘플 컬러로도 정확도가 높은 색변환을 할 수 있으므로 디지털 인쇄의 컬러 관리에 색차가 가장 양호한 GOG 모델을 적용하여 모니터 프로파일을 제작하는 것이 효율적이라고 사료된다.

또한 GOG 모델을 적용하여 장치의 색공간인 모니터 R, G, B를 장치 독립 색공간인 CIEXYZ 삼자극치로 AtoB로 정변환하고, 다시 X, Y, Z 데이터를 모니터의 R, G, B 데이터로 각각 변환시킨 BtoA의 역변환 결과를 Table 7에 나타내었다. 이러한 역변환을 수행하는 것은 컬러 특성화된 입력 장치로부터 전송되어온 XYZ 삼자극치를 모니터 장치에서 디스플레이 할 때 R, G, B 값으로 각각 변환시키기 때문이고, 또한 정변환과 역변환을 반복 수행하여 색변환 방법의 정확성과 효율성을 알 수 있기 때문이다.

따라서 Table 7과 같이 모니터 장치가 AtoB의 역변환한 후 색차를 구한 결과 LCD 모니터는 0.8607이었고, CRT 모니터는 0.9666으로 LCD 모니터가 더 양호한 결과를 나타내었다. 이것은 LCD 모니터가 매개변수를 통한 선형 수식변환에서 오차가 CRT 모니터보다 더 작아져 색재현이 우수하기 때문이라 사료된다.

Table 6. Color Difference Results for Characterization Methods in Monitor

Monitor Device	Test Target	GOG	sRGB	1D LUT
		ΔE^*_{ab}		
LCD	Linear Target	94Avg.= 0.7010 Std. = 0.91462 Max. = 3.7984 Min. = 0.0102	94Avg.= 4.4376 Std. = 2.9302 Max. = 14.5712 Min. = 1.8030	94Avg.= 0.9789 Std. = 0.83247 Max. = 3.7732 Min. = 0.10375
	IT 8.7/2 Target	94Avg.= 0.5402 Std. = 0.71541 Max. = 3.3993 Min. = 0.0273	94Avg.= 8.3632 Std. = 4.8276 Max. = 21.6737 Min. = 3.4604	94Avg.=0.7847 Std. = 1.0404 Max. = 5.8969 Min. = 0.0356
CRT	Linear Target	94Avg.= 0.2957 Std. = 0.3442 Max. = 1.9711 Min = 0.0365	94Avg.= 4.7493 Std. = 4.2054 Max. = 20.2818 Min = 2.0447	94Avg.= 0.6072 Std. = 0.83247 Max. = 3.7732 Min. = 0.10375
	IT 8.7/2 Target	94Avg.= 0.6697 Std. = 1.0120 Max. = 4.3349 Min. = 0.0372	94Avg.= 7.7671 Std. = 4.0012 Max. = 19.0020 Min. = 2.8795	94Avg.=0.7915 Std. = 0.96135 Max. = 5.7101 Min. = 0.0347

Table 7. Color Difference Results for AtoB to BtoA

Monitor Device	LCD	CRT
ΔE^*_{ab}	94Avg.= 0.8607 Std. = 0.9412 Max. = 6.1249	94Avg.= 0.9666 Std. = 1.0446 Max. = 6.276

4. 디지털 인쇄기의 색변환

가. 디지털 인쇄기의 색재현 영역

인쇄 장치의 선형화를 통해 구한 토털 잉크 한계값이 220%였고, 또한 C, M, Y, K 각각의 잉크 한계값을 구하였다. 또한 사용한 인쇄기의 색재현 영역을 알아보기 위하여 이 값을 장치에서 각각 100% 적용하여 인쇄한 후 1차색 C, M, Y와 2차색 R, G, B 값을 측색하였고, 또한 상용으로 많이 사용하는 표준 Japan Color와 ISO의 색재현 영역을 CIELAB 색공간에 각각 비교한 결과 Figure 25와 같았다.

Figure 25와 같이 디지털 인쇄기의 1차색 색재현 영역은 Japan Color와 ISO 잉크의 색재현 영역보다 Y와 R영역, M과 B영역, B와 C영역에서 넓게 나타났다. 하지만 G와 Y영역, R과 M영역은 상대적으로 좁은 결과를 나타내었다. 또한 M색이 다른 표준 컬러들보다 a*축에서 B계열 쪽으로 치우쳐 전체적으로 푸른색 기미가 나타나는 컬러 캐스트 결과를 나타내었고, G색의 경우는 반대로 b*축에 가까워 채도가 상대적으로 높아 색재현 영역이 축소된 결과를 나타내었다. 이것은 잉크젯 방식의 디지털 인쇄기에서 잉크의 총합을 400% 전부 사용하는 것이 아니고, 정확한 색재현을 얻기 위하여 캘리브레이션 단계에서 장치에 맞는 선형화 C, M, Y, K 값을 구하여 각각 적용한 결과라 사료된다. 또한 R계열과 G계열의 색재현 영역이 좁게 나타났는데 이것은 용제형 잉크젯 방식인 인쇄기의 전체적인 색재현 특성에서 비롯된 결과라 사료된다.

디지털 인쇄기의 명도는 Japan Color나 ISO와 비교하여 G는 너무 밝게, R과 C에서 어둡게 색이 재현되었고, 나머지 M, Y, B에서 유사한 경향을

나타내었다. 따라서 이러한 명도의 특성도 장치의 색재현 결과에 가중됨을 알 수 있었다.

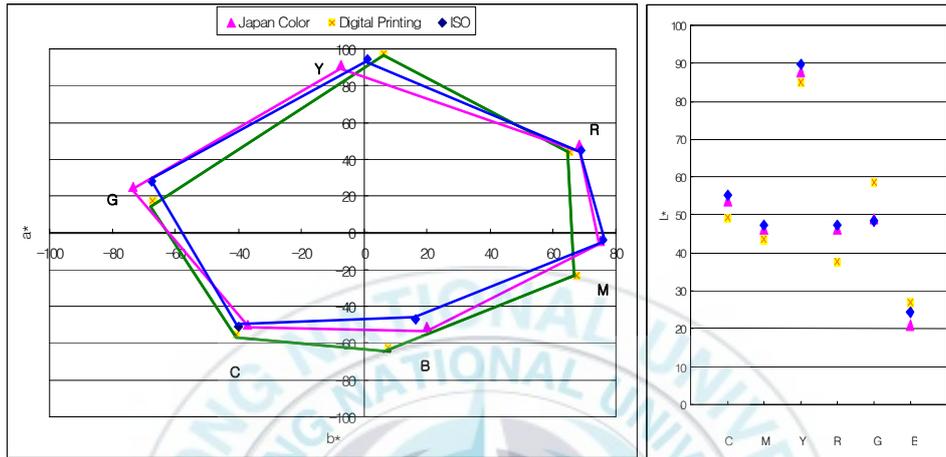


Figure 25. Color gamut of ISO, Japan color and digital print.

나. 디지털 인쇄기의 색변환

(1) CMY에서 CIELAB로 색변환

본 연구에서는 임의의 11×11×11개인 총 1,331개의 패치로 LUT를 제작하였고, ECI2002 visual target의 1,485개의 패치 중 CMY에서 CIELAB로 색변환 할 때 총 729개를 사용하였다. 이때 색변환 방법은 3차원 선형보간법을 적용하였다.

선형 보간방법에 의한 색변환 결과를 평가하기 위하여 ECI2002 visual target CMYK로 구성된 1,485개의 패치를 토털 잉크 한계값을 조절하여 장치의 캘리브레이션이 이루어진 인쇄기에서 미리 인쇄한 후 CIELAB값을

측색하였다. 동시에 동일한 컬러 패치를 사용하여 CMY에서 CIELAB로 색 변환한 후 계산된 1,331개의 CIELAB값과 실측한 값 중 동일한 729개 패치의 CIELAB값 사이의 색차를 구한 결과 Table 8, Figure 26과 같았다.

또한 이때 인쇄기의 캘리브레이션 결과를 확인하기 위해 Roland사에서 제공하는 'Four Dimensional Swatch test' 원고를 5회 반복 인쇄하여 측색한 후, 첫 번째 인쇄물을 기준으로 하여 각 인쇄물의 색차를 계산한 결과를 Table 8에 나타내었다. 그리고 캘리브레이션 과정에서 이루어진 인쇄기의 선형화 후 각각 재현된 C, M, Y, K의 단계별 농도 변화를 알아보기 위하여 'Linearization Pattern Target'을 인쇄한 후 X-Rite 농도계로 측정하여 Figure 27에 나타내었다.

Table 8과 같이 LUT의 제작에 참여하지 않은 임의의 729개 패치에 대한 C, M, Y 값을 1,331개의 패치로 구성된 LUT와 3차원 선형보간법으로 CMY값에 대한 LAB값을 계산하여 구한 계산치와 측정치를 비교한 결과 평균색차가 1.311 정도로 나타났다. Agar와 Allebach의 경우 CMY에서 LAB로의 색변환시 비균등 1,000 격자점에서 보간 방식을 이용하여 색차를 구한 결과 약 1정도이었고, 15,000 격자점일 경우 색차가 0.4 정도이었다.⁴⁶⁾ 또한 Balasubramanian과 Maltz도 색변환시 부분적 선형변환 방법을 적용함으로써 2.6정도의 색차를 구하였다.⁴⁷⁾

또한 Table 8과 같이 본 실험에서 사용한 Roland사의 용제형 디지털 인쇄기의 반복적인 인쇄 정밀도를 알아보기 위하여 색차를 구한 결과 0.998 정도를 나타내었다. 이것은 인쇄기가 반복 재현성에서 비교적 양호한 캘리브레이션 특성을 가지고 있음을 확인할 수 있었다.

Figure 26과 같이 전체적인 패치의 색차를 비교한 결과 대부분의 패치가 2이하를 나타내었지만 특정한 패치에서 큰 색차를 나타내었다. 이러한 결과는 본 실험에서 사용한 프린터 장치의 특성에 따른 결과라 사료되며, 이

러한 색들에 의해 색차가 가중되므로 색변환시 색역 사상이 좀 더 정확하게 이루어질 필요가 있다고 생각된다. 그러나 LUT와 3차원 선형보간을 이용한 CMY에서 LAB로의 색변환은 매우 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

디지털 인쇄기의 캘리브레이션 후 단계별 농도 변화를 확인한 결과 Figure 27과 같이 잉크의 망점 면적율이 증가할수록 C, M, Y잉크의 농도가 증가함으로써 선형화가 적용되었음을 알 수 있었다. 특히 C잉크는 다른 잉크보다 상대적으로 농도가 높게 나타났으며, C, M, Y잉크의 중첩으로 재현되는 K보다도 더 높은 농도값을 나타내었다. 이것은 잉크의 분광반사율 곡선이 이상적이지 못하므로 C, M, Y잉크를 중첩 인쇄했을 때 나타나는 K가 중성회색이 아니고, 갈색의 회색을 나타내므로 이러한 보정을 위한 인쇄기의 기본설정 때문이라 사료된다. 또한 M잉크의 농도값이 다른 잉크의 농도값보다 낮은 이유도 본 실험에 사용한 용제타입의 인쇄기에서 그레이 밸런스를 올바르게 재현하기 위한 출력 장치의 특성화에서 비롯된 결과라 사료된다.

Table 8. Digital Printing Calibration and CMY to LAB Color Transformation Results

ΔE^*_{ab}	Average	Standard deviation	Max	Min
CMY LUT	1.311	0.54	8.84	0.02
Device Calibration	0.99	0.50	3.73	0.01

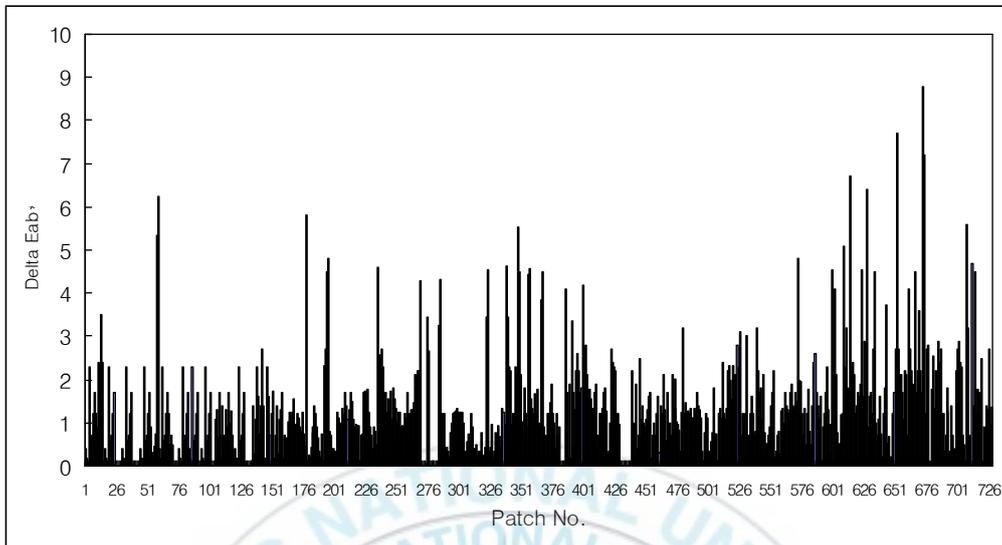


Figure 26. Test results of CMY to LAB color transform using LUT for samples of color patches.

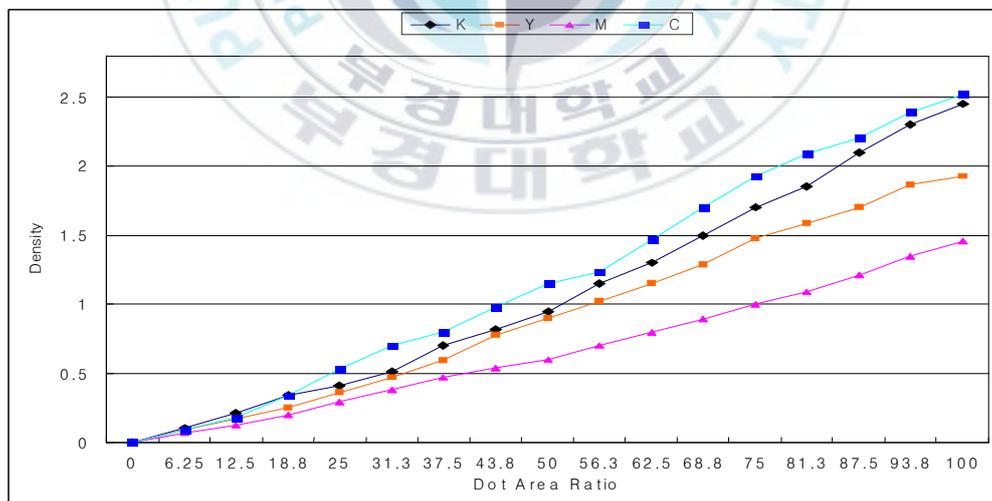


Figure 27. Density variation according to dot area ratio after calibration.

(2) CIELAB에서 CMY로 색변환

CIELAB 공간에서 CMY로 색변환하기 위해 LUT과 4면체 보간법을 사용하였다. 먼저 972개의 입력 patch를 사용하여 1,331개의 CMY를 기본으로 한 LAB LUT로 4면체를 구성하였다. 그리고 LAB를 기본으로 한 CMY LUT를 구성하기 위해 $11 \times 11 \times 11$ 개인 총 1,331개의 LAB값을 입력한 후 입력된 LAB값을 전체 4면체에서 포함하는 여부를 판별한 후 4면체 보간법으로 CMY를 각각 계산하였다. 계산된 값을 인쇄한 후 측색하였고, 측색된 LAB값과 원고의 LAB값을 이용하여 색차를 구하였다. 그 결과를 Table 9에 나타내었다.

Table 9와 같이 전체 색차가 1.67로 CMY-LAB 색변환의 1.311보다 색차가 높게 나타났다. 이것은 LAB에서 CMY로 색변환한 것이 CMY에서 LAB로 색변환한 것보다 단계별 보간의 오차가 많이 발생한 결과라 사료된다.

또한 입력 장치를 통하여 입력된 장치의존 RGB값이 장치독립 CIELAB 값으로 변환된 후 출력 장치인 인쇄기로 전송되어 다시 장치의존 CMY로 출력되기 때문에 역변환이 이루어진다. 따라서 이러한 역변환 수행의 정확성을 확인하기 위하여 먼저 Lab로의 정변환 과정을 통해 입력된 CMY 값에 대한 첫 번째 LAB1 값을 계산하였고, 또한 LAB1 값을 다시 역변환 방식으로 CMY2 값을 계산한 후, CMY2 값을 다시 정변환하여 두 번째 Lab2 값을 계산하여 Table 10에 나타내었다. Table 10과 같이 계산된 Lab1 값과 Lab2 값 사이의 색차를 비교한 결과 2.01 정도의 색차가 발생하였다. 이것은 LAB에서 CMY, CMY에서 LAB로 각각 색변환할 때 발생하는 보간 오차의 결과라 사료되나, 비교적 양호한 결과를 나타냄으로써 색변환의 효율성을 확인할 수 있었다.

Table 9. LAB to CMY Color Transformation Result

94E*ab	Average	Standard Deviation	Max	Min
LAB to CMY	1.67	0.46	7.04	0.08

Table 10. Forward and Reverse Transformation Result for LAB to CMY Color Transformation

94E*ab	Average	Standard Deviation	Max	Min
LAB1 and LAB2	2.01	0.41	9.14	0.01

5. 디지털 인쇄의 컬러 재현

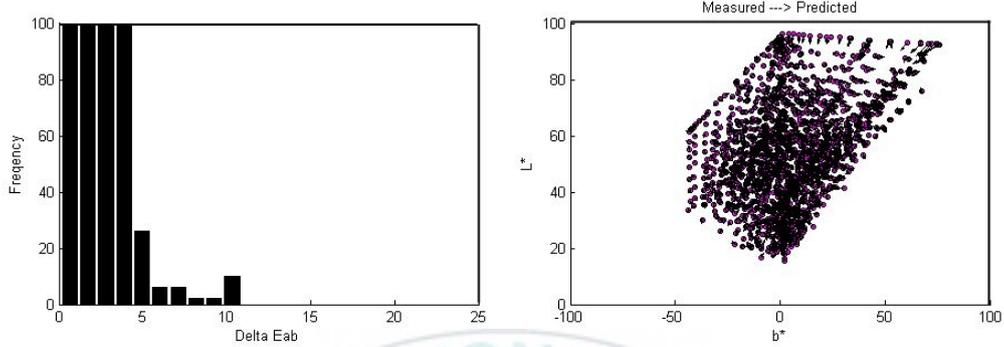
디지털 인쇄의 컬러 재현을 위하여 먼저 장치의존 색공간에서 장치독립 색공간으로 색변환하였다. 입력 장치에서는 다중회귀분석으로 구한 3×20의 매트릭스를 곱하여 XYZ 삼자극치로 변환하였고, 모니터는 GOG 특성화 방법을 선택하여 입력 장치에서 전송된 XYZ 삼자극치를 역변환 매트릭스 3×3을 곱하고, 역 GOG 모델을 적용하여 RGB값으로 색변환하였으며, 그 결과는 색차를 구한 히스토그램과 CIELAB 색공간을 이용하여 Figure 28, 29에 각각 나타내었다. 이 때 입력 장치는 scanner를 사용하였고, 모니터는

CRT와 LCD를 각각 이용하였다.

원고 target과 색변환 후 CRT 모니터에 재현된 target의 색차를 구하여 그 빈도수를 히스토그램으로 나타낸 결과 Figure 28(a)와 같이 패치의 대부분 색차가 5이하임을 알 수 있었다. 또한 Figure 28(b), (c), (d)와 같이 CIELAB 색공간을 통해 비교한 결과 lightness가 높은 패치에서 원고와의 차이가 가중되어 나타났다. 특히 b*축의 +쪽에 존재하는 패치는 lightness가 감소하는 경향을 나타내었고, a*축의 +쪽에서도 패치의 lightness가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 a*축에 존재하는 패치가 b*축에 존재하는 패치보다 원고와의 차이가 가중되어 나타났으며, 특히 a축의 +쪽에서 상대적으로 색변환의 정확성이 떨어짐을 알 수 있었다.

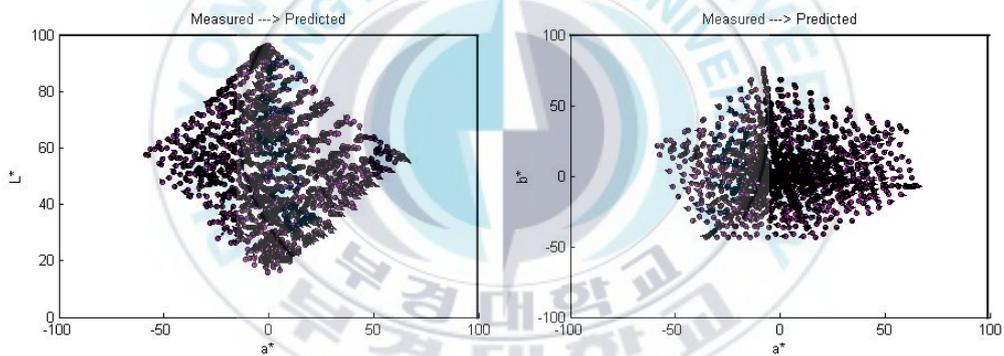
LCD 모니터의 경우 Figure 29(a)의 히스토그램과 같이 scanner에서 CRT 모니터로 색변환한 결과보다 5이상의 색차를 가진 패치의 빈도수가 낮게 나타났다. 또한 Figure 29(b), (c), (d)와 같이 CIELAB 색공간을 통해 비교한 결과 lightness가 낮은 영역의 패치에서 원고와 차이가 가중되어 나타났다. 특히 b*축의 +쪽에 존재하는 패치는 lightness가 감소하는 경향을 나타내었지만, -쪽은 증가하는 경향을 나타내었고, a*축의 경우는 대부분 lightness가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 LCD 모니터에서도 CRT 모니터와 같이 a*축에 존재하는 패치가 b*축에 존재하는 패치보다 원고와의 차이가 가중되어 나타났다.

그러나 전체적으로 scanner를 통해 제작된 target를 모니터로 색변환한 후 원고 target과 비교한 결과 CRT 모니터보다 LCD 모니터에서 더 양호한 결과를 나타내었다. 이것은 비록 입력 장치에서 전송된 동일한 XYZ나 LAB값이라도 R, G, B의 가색 혼합성이 우수한 LCD 모니터에서 수식변환의 오차가 감소되어 CRT 모니터보다 향상된 결과를 가져온 것이라 사료된다.



(a) color difference histogram

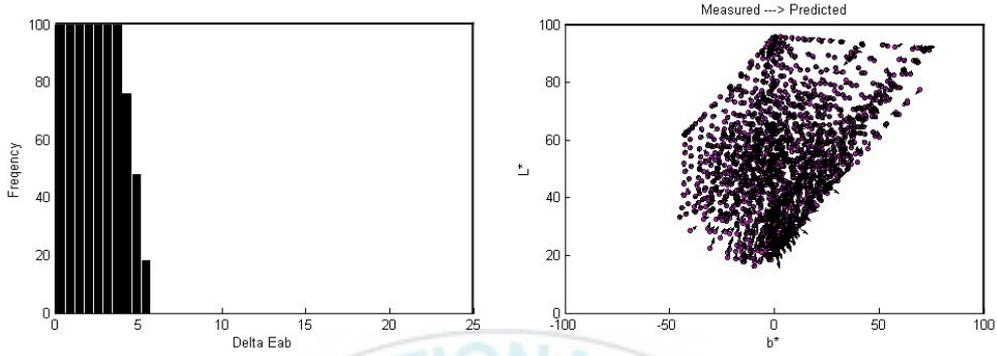
(b) original L^*b^* to monitor L^*b^*



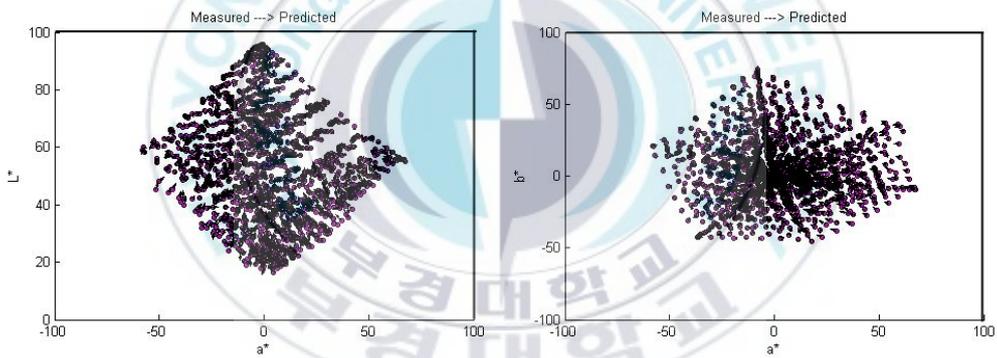
(c) original L^*a^* to monitor L^*a^*

(d) original a^*b^* to monitor a^*b^*

Figure 28. Color transformation results by scanner to CRT monitor [(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to monitor L^*b^* , (c) original L^*a^* to monitor L^*a^* , (d) original a^*b^* to monitor a^*b^*].



(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to monitor L^*b^*



(c) original L^*a^* to monitor L^*a^* (d) original a^*b^* to monitor a^*b^*

Figure 29. Color transformation results by scanner to LCD monitor [(a) color difference histogram (b) original L^*b^* to monitor L^*b^* , (c) original L^*a^* to monitor L^*a^* , (d) original a^*b^* to monitor a^*b^*].

또한 인쇄기인 경우 입력 장치에서 전송된 XYZ 삼자극치를 LAB값으로 변환하였고, 변환된 LAB값을 LUT과 4면체 보간으로 CMY를 계산하였다. 또한 원고 target과 인쇄물 target의 색차를 최소화하기 위한 방법으로 LAB값에 black 생성을 고려하여 계산된 CMY를 다시 LAB값으로 역색변환하였다. 변환된 LAB값에 ProfileMaker 5.0에서 상용으로 지원되는 C, M, Y의 유채색 양을 단계적으로 줄이고, black양을 늘이는 GCR의 네 가지 방법을 적용하였다. 또한 출력 장치의 색재현 범위가 입력 장치의 색재현 영역보다 좁기 때문에 원고와의 색차를 최소화하기 위해 먼저 ICC에서 기본으로 제시하는 색재현을 고려한 색역 압축으로 perceptual, relative, saturation, absolute rendering intent 등 네 가지 방법을 적용하여 출력하였다. 출력한 인쇄물을 측색하여 원고와의 색차 및 lightness, chroma값을 구하였고, 그 결과를 Table 11과 Figure 30, 31에 각각 나타내었다.

Table 11. LAB to CMY Color Transformation Result using Black Generation Methods(GCR1, GCR2, GCR3, GCR4)

94E*ab		Average	Standard Deviation	Max	Min
LAB to CMY	GCR1	3.81	0.67	12.50	0.02
	GCR2	3.84	0.99	11.89	0.14
	GCR3	3.80	0.96	12.16	0.03
	GCR4	3.89	0.92	11.88	0.07

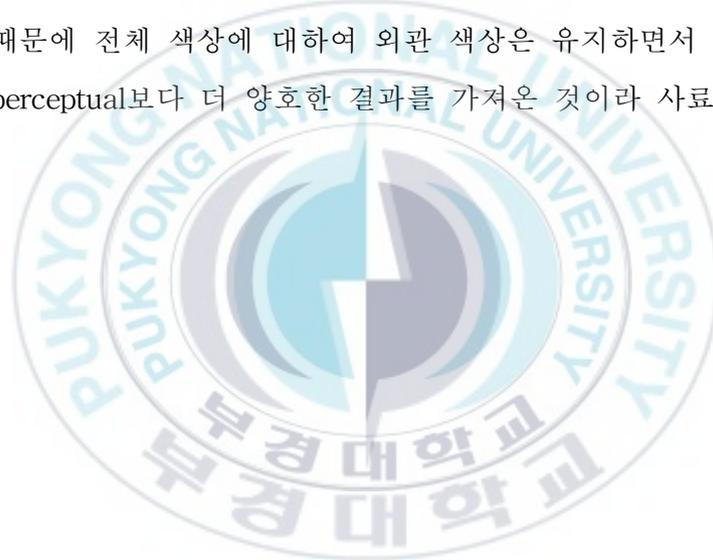
또한 RIT의 Robert Chung이 고안한 CRT(cumulative relative frequency) 곡선으로 원고와의 최소 색차에서 최대 색차까지의 전체 색차 범위를 빈도수에 따라 순위별로 구한 후 시각적인 그래프로 확인하고자 Figure 32에 나타내었다. 특히 평가 기준은 50%, 90%, 100%의 색차 변화를 기본으로 하였고, 이 때 black양 생성방법은 GCR1으로 하였다. 또한 색역 사상방법은 최소의 디테일을 손실하지 않고, 컬러 재현에 chroma를 강조하는 방식을 적용하였다.

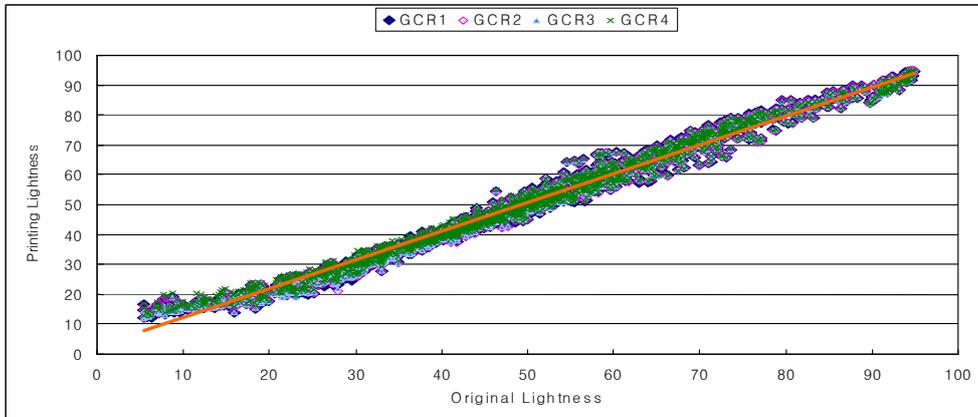
Black량을 고려하지 않은 색변환에서는 입력 원고와의 전체 색차가 4.18이었다. 그러나 Table 11과 같이 black량을 고려한 GCR방법에서는 색차가 각각 3.81, 3.84, 3.80, 3.89로 색차가 감소됨을 알 수 있었다. 이것은 black량을 고려한 샘플링과 함께 보간 방법을 사용함으로써 black량을 고려하지 않은 색변환보다 상대적으로 정확도가 향상된 결과라 사료되며, 따라서 CIELAB에서 CMY로 색변환할 때 black량을 고려한 색변환이 더 정확함을 확인하였다.

또한 GCR 적용방법에 따른 인쇄물의 결과와 원고 target과의 색재현 정도를 확인하기 위하여 LAB값을 이용하여 lightness, chroma를 구한 결과 Figure 30, 31과 같이 lightness인 경우는 GCR1, GCR2, GCR3, GCR4 모두 어두운 영역에서는 원고보다 lightness가 증가하는 경향을 나타내었지만, 밝은 영역에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 lightness가 60~80 사이에서 가장 원고와 다른 차이를 나타냄으로서 이 영역에 존재하는 색이 다른 영역보다 원고와 다른 lightness 재현이 이루어짐을 확인하였다. 또한 chroma를 비교한 결과 chroma값이 전체적으로 GCR1, GCR2, GCR3, GCR4 모두 유사한 경향을 나타내었지만, 특히 20~40 사이에 존재하는 컬러패치의 경우 원고와 차이가 가중되어 상대적으로 폭이 넓게 나타났다. 이것은 LAB에서 CMY로 색변환할 때 생긴 보간 오차와 인쇄기의 재현정

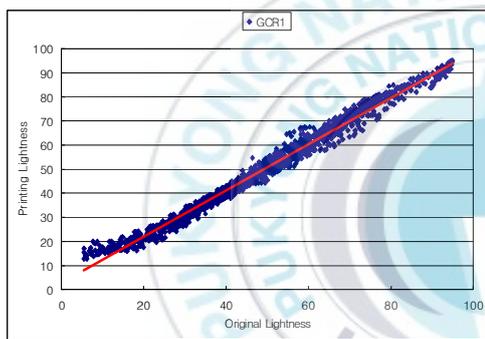
도 및 black량의 결정에서 발생하는 결과라 사료된다.

Figure 32와 같이 CRT 곡선을 통해 평균 색차뿐만 아니라 각 패치들의 색차 빈도수를 확인한 결과 50%, 90%, 100%의 평균 색차가 relative인 경우 3.43, 6.66, 12.59이었고, perceptual인 경우는 5.02, 8.05, 14.49이었으며, saturation인 경우는 4.79, 7.76, 13.57, absolute인 경우 4.26, 7.17, 12.8이었다. 따라서 색재현을 고려한 색역 압축방법에서 relative가 가장 적은 평균 색차를 나타내었다. 이것은 Relative인 경우 색역 안의 색상은 정확하게 재현할 수 있고, 색역 밖의 색상은 재현할 수 있는 색상의 가장 가까운 점에 맞춰지기 때문에 전체 색상에 대하여 외관 색상은 유지하면서 색역 안으로 압축하는 perceptual보다 더 양호한 결과를 가져온 것이라 사료된다.

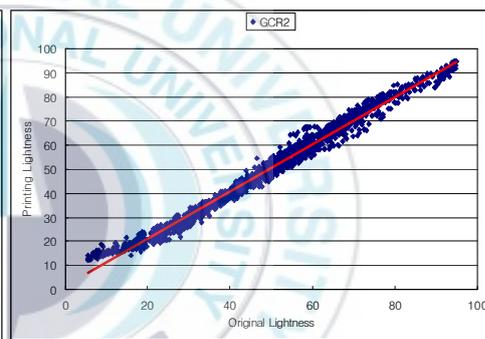




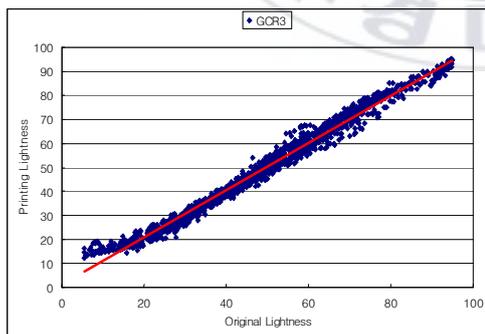
(a) Original and GCR1, GCR2, GCR3, GCR4



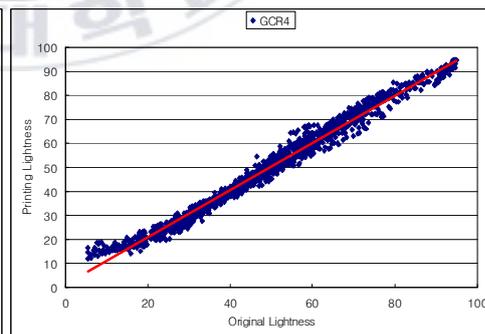
(b) Original and GCR1



(c) Original and GCR2

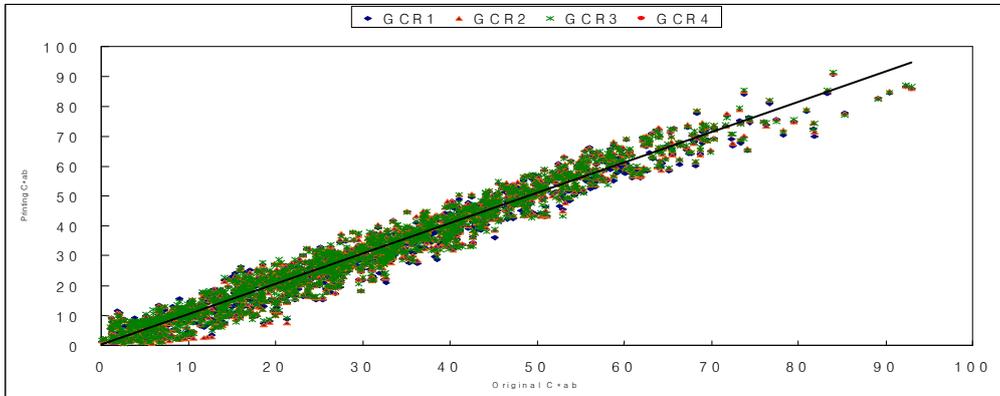


(d) Original and GCR3

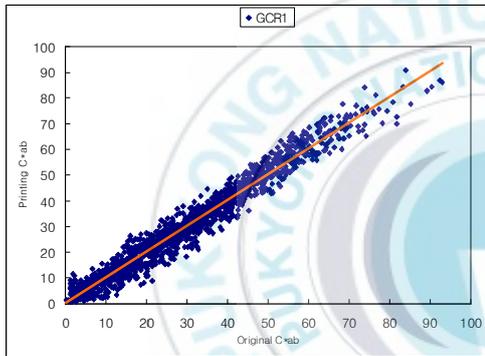


(e) Original and GCR4

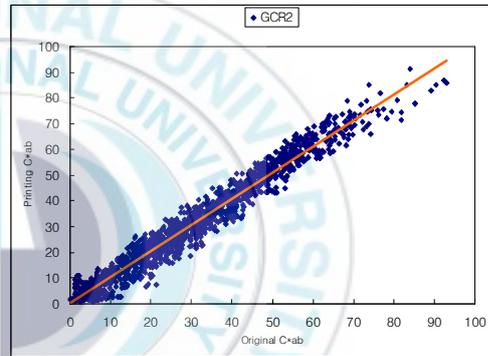
Figure 30. Lightness comparison after LAB to CMY color transformation using black generation.



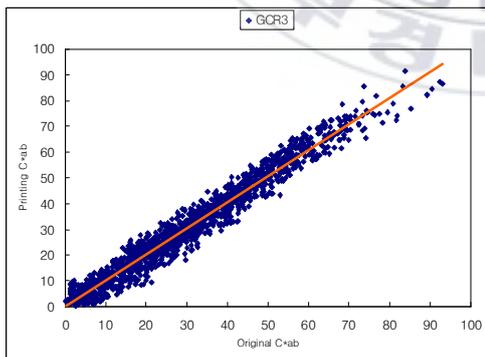
(a) Original and GCR1, GCR2, GCR3, GCR4



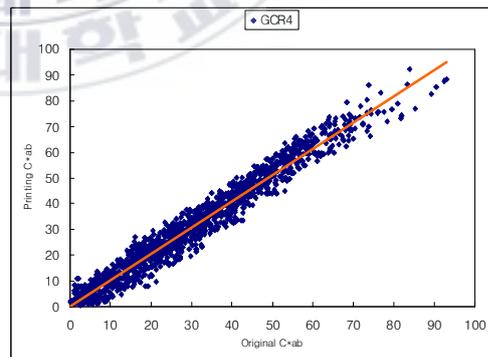
(b) Original and GCR1



(c) Original and GCR2



(d) Original and GCR3



(e) Original and GCR4

Figure 31. Chroma comparison after LAB to CMY color transformation using black generation.

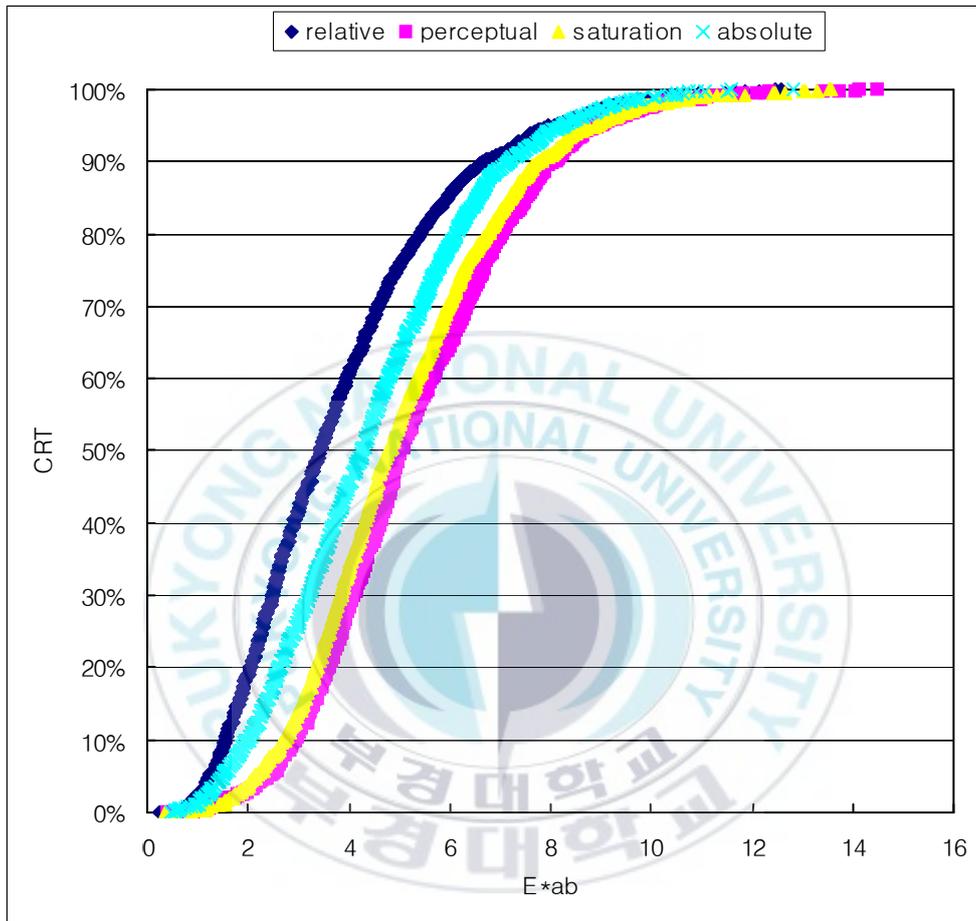


Figure 32. Comparison of CRT curves for rendering intent.

V. 결 론

디지털 인쇄물의 최적화에 가장 큰 변수인 컬러 재현을 올바르게 처리하기 위하여 입력 장치에서부터 출력 장치까지 다양한 색변환 방법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 입력 장치인 스캐너와 디지털 카메라는 모두 CCD 입력 센스를 기반으로 하지만, 스캐너의 정확한 원고의 입력 값에 의해 다중회귀분석을 이용한 색변환시 원고와의 평균 색차가 스캐너는 0.7142, 디지털 카메라는 1.5144로 스캐너가 디지털 카메라보다 양호한 결과를 얻었다. 또한 스캐너의 색차는 lightness, chroma보다 hue-angle 차이에 가중되어 나타났지만, 디지털 카메라는 lightness, chroma, hue-angle 차이에 모두 가중되어 색차가 발생하였다.
2. GOG 모델을 적용한 색변환에서 linear target인 경우 평균 색차가 LCD는 0.7010이고, CRT는 0.2957이었고, IT8.7/2 target의 경우는 LCD가 0.5402, CRT는 0.6697로 sRGB와 1D LUT의 색변환 방법보다 양호한 결과를 얻었다. GOG 모델은 특성화 과정에서 비선형 관계의 원인인 gamma 매개변수에 gain과 offset 매개변수를 추가로 계산함으로써 정확성을 높일 수 있으므로 디지털 인쇄의 모니터 컬러관리에 유용함을 확인하였다. 또한 모니터 색변환 방법의 정확성과 효율성을 확인하기 위하여 정변환과 역변환을 반복 수행한 결과 평균 색차가 LCD 모니터는 0.8607이었고, CRT 모니터는 0.9666으로 LCD 모니터가 더 양호한 결과를 나타내었다.

3. 디지털 인쇄기에서 LUT와 3차원 선형 보간을 이용한 CMY에서 CIE LAB로의 색변환시 원고와의 평균 색차가 1.311로 비교적 양호한 결과를 얻었다. 또한 LUT과 4면체 보간법을 이용한 CIELAB에서 CMY로 색변환시 원고와 평균 색차가 1.67로 CIELAB에서 CMY로 색변환한 것이 CMY에서 CIELAB로 색변환한 것보다 단계별 보간의 오차가 많이 발생하였다.

4. 디지털 인쇄의 컬러 재현에서 모니터의 경우 입력 장치의 다중회귀분석으로 변환한 XYZ 삼자극치를 역변환 매트릭스를 곱하고, 역 GOG 모델을 적용하여 모니터 RGB값으로 색변환한 후 원고와의 색차를 구한 결과 대부분의 패치가 5이하의 색차를 나타내었다. 또한 인쇄기인 경우 입력 장치에서 전송된 XYZ 삼자극치를 LAB값으로 변환하였고, 변환된 LAB값을 LUT과 4면체 보간으로 CMY를 계산할 때 black량을 고려한 색변환이 더 정확하였다. 또한 원고와의 색차를 최소화하기 위해 적용한 색역 사상에서는 relative rendering intent가 가장 양호한 결과를 나타내었다.

References

- 1) J. D. Clippeler, "Device Independent Color Reproduction", *Proc. TAGA*, p. 98 ~ 106 (1993).
- 2) G. Sharma, "Digital Color Image Hand Book", CRC Press, chapter 5 (2003).
- 3) H. R. Kang, "Color Scanner Calibration", *J. Imag. Sci. Tech*, p. 162 ~ 170 (1992).
- 4) P. C. Hung, "Colorimetric Calibration for Scanners and Media", *Proc. SPIE 1448* p. 164 ~ 174 (1991).
- 5) P. C. Hung, Colorimetric Calibration in Electronic Imaging Devices using a Look-up Table Model and Interpolation, *J. Electronic Imaging*, 2(1), p. 53 ~ 61 (1993).
- 6) L. T. Maloney, B. A. Wandell, "Color constancy : A Method for recovering Surface Spectral Reflectance", *J. Opt. Soc. Amer. A*, vol. 3, No. 1, p. 29 ~ 33 (1986).
- 7) H. Haneishi, Y. Miyake, "Colorimetric Precision in Scanner Calibration using Matrices", *IS&T*, p. 106 ~ 108 (1995).
- 8) R. S. Berns, R. J. Motta, and M. E. Gorzynski, "CRT Colorimetry. Part I : Theory and Practice", *color Res. Appl.* 18, p. 299 ~ 314 (1993).
- 9) R. S. Berns, "Methods for characterizing CRT Displays", *Displays*, Vol. 16, No. 4, ISSN 0141~9382, p. 173 ~ 182 (1996).
- 10) Y. S. Kwak, L. W. MacDonald, "Characterization of a Desktop LCD

- Projector", *Displays*, 21, p. 179 ~ 194 (2000).
- 11) International Color Consortium, "ICC Profile Format Specification", Version 3.4, August (1997).
 - 12) R. Y. Chung, Y. Komori, "ICC based CMS & Its color matching performance", *Proc. TAGA*, (1998).
 - 13) M. Has, T. Newmam, "Color management: current practice and the adoption of a new standard" (1995).
 - 14) R. M. Adams, J. B. Weisberg, "The GATF practical guide to color management", Pittsburgh, Pennsylvania, USA: GATF Press, ISBN 0-88362-202-5 (1998).
 - 15) Tominaga, "Color Notation Conversion by Neural Network", *Color Research and Application*, Vol. 18, p. 253 ~ 259 (1993).
 - 16) C. Poynton, "Frequently asked questions about gamma", <URL : http://www.inforamp.net/~poynton/notes/color_and_gamma/GammaFAQ.html> (1998).
 - 17) V. Cheung, S. Westland, and M. Thomson, "Accurate Estimation of the Nonlinearity of Input/Output Response for Color Cameras", *Color Research and Application*, Vol. 29, No. 6 (2004).
 - 18) IEC 61966-2/1FDIS : Multimedia Systems and Equipment-Color Measurement and Management Part 2-1 : Color Management Default RGB Color Space-sRGB.
 - 19) M. Stokes, M. Anderson, and S. Chandrasekar, R. Motta, "A Standard Default Color Space for the Internet" sRGB (1996).
 - 20) H. E. J Neugebauer, "Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendruckes", *Z. wiss. Photogr.*, 36, pp. 73~89 (1937).

- 21) R. Rolleston and R. Balasubramanian "Accuracy of various types of Neugebauer model", IS&T/SID Color Conference (1993).
- 22) H. Zeng and P. G. Anderson, "An expended Neugebauer model for printer color formation", Proc. SPIE 3648. pp. 27~36 (1999).
- 23) J. A. C. Yule and W. J. Nielsen, "The Penetration of light into Paper and its Effect on Halftone Reproduction", Proc. TAGA, pp. 65~76 (1951).
- 24) F. R. Clapper and J. A. C. Yule, "The effect of multiple Internal Peflections on the Densities of Halftone Prints on Paper", J. Opt. Soci. America., 43(7) pp. 600~603 (1953).
- 25) R. Balasubramanian and M. S. Maltz, "Refinement of printer transformations using weighted regression", Proc. SPIE 2658, pp. 334~340 (1996).
- 26) J. Morovic, & M. R. Luo, "Gamut Mapping Algorithms Based on Psychophysical Experiment", Proc. IS&T/SID Color Imaging Conf., 5, pp. 44~49 (1997).
- 27) J. Morovic, "To Develop a Universal Gamut Mapping Algorithm", Ph. D. Thesis, Univ. of Derby (1998).
- 28) T. Hoshino, & R. S. Berns, "Color Gamut Mapping Techniques for Color Hard Copy Images", SPIE 1909 , pp. 152~164 (1993).
- 29) K. M. Braun, "Development and Evaluation of Six Gamut Mapping Algorithms for Pictorial Images", 7th CIC, pp. 144~148 (1999).
- 30) K. M. Braun, "Gamut-Mapping Techniques for Business Graphics", 7th, CIC, pp. 149~154 (1999).
- 31) K. M. Braun, "Gamut-Mapping Techniques for Business Graphics",

- 7th *CIC*, pp. 149~154 (1999).
- 32) E. D. Montag and M. D Fairchild, "Gamut Mapping : Evaluation of Chroma Clipping Techniques for Three Destination Gamuts", 6th *CIC*, pp. 57~61 (1998).
 - 33) M. Shimizu, S. Semba, S. Suzuki, "Gamut Mapping Algorithms Suitable for Implementation to Device Profiles", 6th *CIC*, pp. 169~172 (1998).
 - 34) M. D. Fairchild, "Color Appearance Models", ADDISON-WESLEY (1997).
 - 35) J. von Kries, "Beitra zur Physiologie der Gesichtsempfinding", Arch Anat, physiol. pp. 5050~5524 (1878).
 - 36) R. W. G. Hunt, "Measuring Color", 3rd Edition, Fountain Press (1998).
 - 37) "'International Color Consortium', International Color Consortium profile format", (1998). <URL : ftp : //sgigate.sgi.com / pub / icc / ICC34.pdf>
 - 38) B. Fraser, C. Murphy and F. Bunting, "Real World Color Management", 2rd Edition (2005).
 - 39) R. S. Fisch, "A Study of Image Colormetric And Tonal Changes when Transferred from one Imaging Media to Another", TAGA, 3M, pp. 929 (1992).
 - 40) M. Schwartz, "Measurement of Gray Component Reduction in Neutrals and Saturated Industry", TAGA, Eikonix, 16 (1985).
 - 41) T. J. Cholewo, "Conversion between CMYK spaces preserving black separation", Lexington, KY, USA, Lexmark International, inc.

- 42) L. W. MacDonald, "CIELAB Hue-angle Anomalies at Low Tristimulus Ratios", *Color Research and Application*, Vol. 5, pp. 139 ~ 143 (1980).
- 43) L. W. MacDonald, "Industrial pass/fail Color Matching, Part 1-Preparation of Visual Color-Matching Data", *J. Soc. Dyers Color*, Vol. 96, pp. 372 ~ 376 (1980).
- 44) L. W. MacDonald, "Industrial pass/fail Color Matching, Part 2-Methods of Fitting Tolerance Ellipsoids", *J. Soc. Dyers Color*, Vol. 96, pp. 418 ~ 433 (1980).
- 45) L. W. MacDonald, "Industrial pass/fail Color Matching, Part 3-Development of pass/fail Formula for Use with Instrumental Measurement of Color Difference", *J. Soc. Dyers Color*, Vol. 96, pp. 486 ~ 485 (1980).
- 46) A. U. Agar and J. P. Allebach, "A Minimax Method for Sequential Linear Interpolation of Nonlinear Color Transformations", 4th, CIC, pp. 1~5 (1996).
- 47) R. Balasubramanian and M. S. Maltz, "Refinement of printer transformations using weighted regression", *Proc. SPIE 2658*, pp. 334~340 (1996).