

논문 2008-45SP-1-4

모바일폰용 TFT-LCD와 AMOLED의 색재현성 평가

(Evaluation of Color Reproduction Characteristics of TFT-LCD and AMOLED for Mobile Phone)

박 태 용*, 이 철 희**, 하 영 호***

(Tae-Yong Park, Cheol-Hee Lee, and Yeong-Ho Ha)

요 약

디스플레이 기술이 급격히 발전함과 동시에 디스플레이 종류 또한 다양해지면서 디스플레이의 화질평가에 대한 중요성이 대두되고 있다. 화질평가에는 명암비, 색재현율, 색온도 및 감마 특성 등 물리적인 측정에 의한 정량적인 평가 방법이 사용되어 왔지만, 최종적인 화질의 비교·평가는 관측자가 느끼는 주관적인 인지 화질에 의해 이루어진다. 이에 디스플레이가 가지고 있는 물리적 특성과 관측자가 느끼는 감성 화질 사이의 상관관계를 정립할 필요성이 있다. 따라서 본 논문에서는 Video Electronics Standards Association (VESA) Flat Panel Display Measurements (FPDM) version 2.0의 표준에 따른 측정을 통하여 모바일용 TFT-LCD와 AMOLED가 가지고 있는 색재현 특성 - 명암비, 기준 백색에 대한 색온도, 회색 계조의 색도 일관성 및 감마 특성, RGB 채널별 계조의 감마 특성, 디스플레이 장치의 색역 크기 - 을 객관적으로 비교·평가한다. 그 다음, 주요평가 항목을 중심으로 일반 관측자뿐만 아니라 색채 전공자에 의한 다양한 주관적 화질 평가를 수행하고, 이 평가 결과를 뒷받침 할 수 있는 정량적인 자료 및 근거를 제시한다. 이를 통해 화질 향상을 위해 색재현 관점에서 TFT-LCD와 AMOLED가 고려해야할 방향을 제시한다.

Abstract

With the rapid development of display technology as well as the diversity of display, image quality assessment plays an important role in display color reproduction. The image quality has described by objective evaluation based on the physical measured data, such as contrast ratio, color reproduction range, color temperature, and gamma characteristics, etc., however, the final judgement is achieved by perceptual quality assessment of observers. Therefore, it is necessary to investigate the relationship between physical performance of display and perceptual image quality. Thus, in order to evaluate objectively the color reproduction characteristics of two mobile displays, TFT-LCD and AMOLED, we measured the darkroom contrast ratio of full screen, luminance and color temperature of full-screen white, full-screen gray and color linearity, tone reproduction of color scales for each RGB primary, and color reproduction range. Then the pair-wise comparison is implemented for image experts and naive observers not only to judge their preference on principal evaluation attributes but also to subjectively describe perceived image quality. Through two evaluation processes, we derived the objective bases that can prove the results of subjective image quality assessment by interconnecting physical factors that have influence on observers' preference judgements. Finally, this paper provided important information for improving the image quality and increasing preference from an observer's point of view.

Keywords : Image quality assessment, TFT-LCD, AMOLED

* 학생회원, *** 정회원, 경북대학교 전자전기컴퓨터학부
(School of Electrical Engineering and Computer Science, Kyungpook National University)

** 정회원, 안동대학교 컴퓨터공학전공
(Major of Computer Engineering, Andong National University)

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

접수일자: 2007년4월2일, 수정완료일: 2007년12월27일

I. 서 론

디스플레이의 휴대화, 저 소비전력화, 경량화, 평면화의 요구에 따라 FPD(Flat Panel Display)에 대한 관심이 높아지면서 주류를 형성하고 있던 CRT(Cathod Ray Tube)에서 LCD(Liquid Crystal Display)로의 대체가 급속히 이루어지고 있는 한편, OLED(Organic Light

Emitting Diode)와 같은 차세대 평판 디스플레이의 출현으로 디스플레이 간 경쟁이 심화되고 있다^[1]. 현재 평판 디스플레이 중 LCD가 휴대 단말기, PC 모니터 그리고 TV에 이르기까지 다양한 제품에 적용되고 있으며, OLED 디스플레이는 빠른 응답 속도, 광 시야각 등의 특성으로 인하여 LCD를 대체할 수 있는 차세대 디스플레이로 각광을 받고 있으며 실용화 단계에 이르고 있다. 또한 화면을 구현하는 물질인 유기물질에서 스스로 빛을 내는 소자(자발광 소자)이기 때문에 LCD처럼 별도의 백라이트(Backlight)가 필요 없다. 이로 인해 전력 소모가 적어 배터리 수명을 연장 할 수 있는 동시에 백라이트가 위치하는 공간만큼 얇게 만들 수 있는 특성을 가지고 있다. 더불어 자발광 소자인 PDP와 비교하면 대형 화면을 구현하는 데서만 뒤쳐질 뿐 해상도나 소비 전력에서 월등한 경쟁력을 갖는 것이 OLED이다. 이 같은 장점 때문에 OLED는 최근 들어 휴대전화나 PDA 등 모바일 제품에서 ‘얇고, 오래 쓰고, 선명한’ 디스플레이로 급부상하고 있다^[2]. 이와 같이 디스플레이 기술이 급격히 발전함과 동시에 디스플레이 종류 또한 다양해지면서 디스플레이의 화질(Image quality) 평가에 대한 중요성이 대두되고 있다. 그러나 화질을 평가하는데 있어 적절한 척도를 결정하는 것은 쉽지 않다. 그 이유는 휘도, 명암비, 색재현율 등 디스플레이의 화질을 결정하는 물리적인 특성들이 수치적으로 표현된다고 할지라도, 최종적인 화질의 비교·평가는 시청자가 느끼는 주관적인 인지 화질에 의해 이루어지기 때문이다. 이에 디스플레이의 최종적인 주관적 화질에 미치는 물리적 특성들을 알기위해 Peter G. J. Barten은 SQRI(Square Root Integral) 방법을 사용하여 물리적 데이터와 인간 시각계의 심리물리학적(Psychophysical) 관계뿐만 아니라 SQRI 값과 주관적 화질 평가 점수 사이의 상관관계를 분석하였다^[3~4]. 하지만 SQRI 방법이 색을 고려할 수 없다는 단점으로 인해 주관적 화질 평가 척도로서 개선이 요구되어진다. 이에 본 논문에서는 VESA FPDM version 2.0 표준^[5]에 따른 측정을 통하여 모바일용 TFT-LCD와 AMOLED의 색재현 특성 - 기준 백색 및 블랙의 휘도 측정을 통한 명암비, 기준 백색에 대한 색온도, 회색 계조의 색도 일관성 및 감마 특성, RGB 채널별 감마 특성, 두 디스플레이 장치의 색역 크기 - 을 객관적으로 비교·평가한다.

또한, 대표적인 주관적 화질 평가 항목별 다양한 테스트 영상에 대해 다수의 일반 관측자뿐만 아니라 색채공학 전공자를 통한 주관적인 색재현 느낌과 선호도를

평가하고, 이 평가 결과를 뒷받침 할 수 있는 정량적인 자료 및 근거를 제시한다. 이를 통해 디스플레이의 물리적 특성과 관측자의 인지 화질간의 상관관계를 분석하고, 앞으로 화질 향상을 위해 TFT-LCD와 AMOLED가 고려해야할 방향을 제시한다.

본 논문은 II장에서 디스플레이의 객관적 색재현성을 평가하고, III장에서 주관적 화질 평가 및 정량적 결과와의 관계를 분석한다. 향후 모바일용 디스플레이의 화질 개선 방향에 대해 IV장에서 설명한 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. 디스플레이의 객관적 색재현 성능평가

1. 디스플레이의 초기 상태 설정

실험에 앞서 모바일용 TFT-LCD와 AMOLED의 초기 상태 설정이 필요하다. TFT-LCD의 경우, 테스트 보드에 있는 백라이트 가변 저항(B/L ADJ)을 조절함으로써 기준 백색에 대한 휘도(Y)를 설정할 수 있지만,

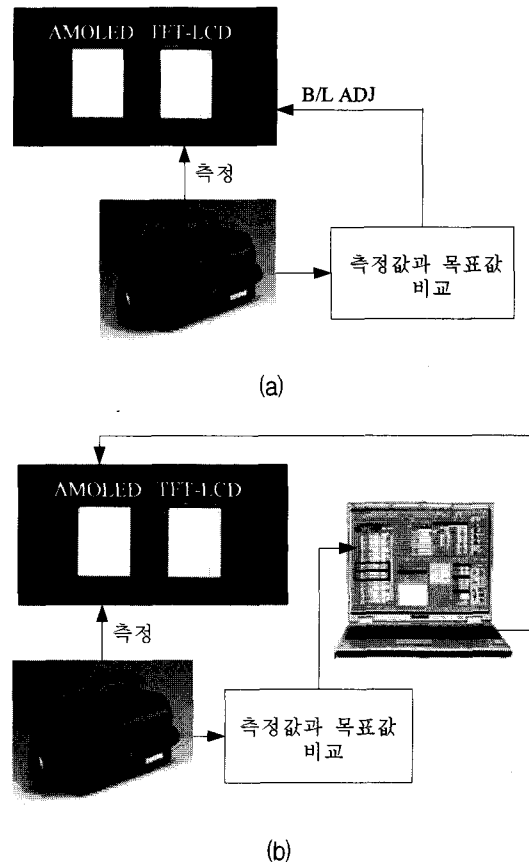


그림 1. 디스플레이의 초기 상태 설정; (a) TFT-LCD, (b) AMOLED

Fig. 1. Set up of initial display condition; (a) TFT-LCD and (b) AMOLED.

RGB 색도값(xy)은 고정되어 있어 조절이 불가능하다. 이에 반해 AMOLED의 경우에는 보드 제어 프로그램을 통하여 기준 백색에 대한 휘도와 색도값 뿐만 아니라 회색 계조의 감마값(γ)에 대한 목표값을 설정할 수 있다. 그림 1은 디스플레이의 초기 상태 설정 과정을 보여주고 있다. 그림 1(a)의 TFT-LCD는 분광방사휘도계(Spectroradiometer; Minolta CS-1000)를 이용하여 기준 백색을 측정 후, 측정값과 목표값($Y=200 \text{ cd/m}^2$)을 비교한다. 목표값이 설정될 때까지 B/L ADJ를 조절하여 재측정하는 과정을 반복한다. 그림 1(b)의 AMOLED의 경우, 측정값과 목표값($(x,y)=(0.3000, 0.3100)$, $Y=200 \text{ cd/m}^2$, $\gamma=2.2$)을 비교한 후, 보드 제어 프로그램에서 xy , Y 및 γ 조절 변수를 바꿔가며 재측정하는 과정을 반복한다.

2. 기준 백색의 색온도 비교

디스플레이에서 기준 백색의 색온도를 측정하기 위해 디스플레이별로 기준 백색을 띄운 후, CIEXYZ 삼차극치를 정확히 측정할 수 있는 분광광도계를 이용하여 기준 백색을 측정한다. 여기서 Y값은 휘도이며, 기준 백색의 색온도를 구하기 위하여 측정된 CIEXYZ 값을 다음과 같이 xy 색도 좌표로 변환한다.

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (1)$$

그림 2(a)는 플랑키안 궤적(Planckian locus; solid line), CIE D65, CIE D75 표준 광원과 TFT-LCD, AMOLED의 색온도를 xy 색도도에 표시한 것이다. 여기서 CIE D65와 CIE D75 색온도 점을 이으면 플랑키안 궤적과 평행하게 위치한 주광궤적(Daylight locus)이 된다. 디스플레이의 색온도가 주광궤적보다 위로 올라가면 색온도에 따라 Yellow-Green-Cyan 톤이 증가해서 백색이 탁하고 지저분해 보이게 되며, 반대로 주광궤적 밑으로 색온도 좌표가 내려가면 핑크톤이 돌아 색온도가 높더라도 불그스름한 기운이 돌게 된다[6]. 그림 2(b)는 그림 2(a) 그래프를 확대한 것으로 TFT-LCD의 경우, 백색의 색온도가 주광궤적보다 위로 올라가 있지만, AMOLED의 경우 백색의 색온도가 주광궤적 아래에 위치해 있다는 것을 알 수 있다. 같은 색온도라 하더라도 주광궤적으로부터의 색 차이(Δuv 혹은 $\Delta u'v'$)가 일정한 수준 이상이 되면 다른 색으로 보이게 된다. 두 개의 디스플레이를 동시에 나란히 비교할 때에는

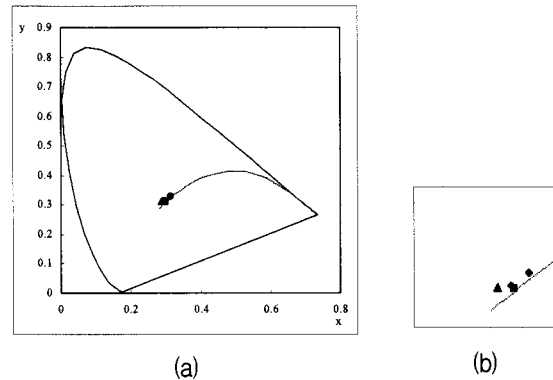


그림 2. (a) 플랑키안 궤적 및 CIE D65, CIE D75, TFT-LCD, AMOLED의 백색 xy 색도 좌표, (b) 확대 그림

Fig. 2. (a) Planckian locus and CIE xy chromaticity coordinates of CIE D65, CIE D75, and reference white for TFT-LCD and AMOLED, (b) magnified version of (a).

Δuv 가 약 0.004만 되어도 차이를 느낀다고 한다^[6]. 이를 MPCD(Minimum Perceptible Color Difference)라고 한다^[7]. 따라서 본 논문에서는 백색이 어떤 톤을 띄는지 알아보기 위해 “VESA FPDM 302-6A White-point accuracy^[5]”를 바탕으로 상관 색온도(CCT, Correlated Color Temperature)를 구하고 UCS(Uniform Color Space)인 $u'v'$ 색도 좌표(u'_w, v'_w)를 계산하여 주광궤적 상의 u'_d, v'_d 좌표(u'_d, v'_d)와의 색차를 구한다. 먼저 각 디스플레이의 색온도 x_w, y_w 좌표를 이용하여 McCamy 공식에 의해 다음과 같이 상관 색온도를 구한다.

$$T = 437n^3 + 3601n^2 + 6831n + 5517$$

where, $n = (x_w - 0.3320)/(0.1858 - y_w)$ (2)

그 다음 앞에서 구한 상관 색온도를 이용하여 주광궤적 상의 x_d, y_d 좌표값을 다음과 같이 구한다. 먼저 $g = 1000/T$ 로 정의한다.

만일 $T < 7000$ 이면

$$x_d = -4.6070g^3 + 2.9678g^2 + 0.09911g + 0.244063$$

만일 $T > 7000$ 이면

$$x_d = -2.2264g^3 + 1.9018g^2 + 0.24748g + 0.237040$$

그리고 $y_d = -3.000x_d + 2.870x_d - 0.275$ (3)

표 1. TFT-LCD와 AMOLED 대한 백색의 색온도 비교

Table 1. Comparison of color temperature for TFT-LCD and AMOLED reference white.

	AMOLED	TFT-LCD
측정된 기준백색의 xy 좌표 : (x_w, y_w)	(0.2990, 0.3130)	(0.2859, 0.3133)
상관 색온도 : T	7539K	8478K
주광 궤적 상의 xy 좌표 : (x_d, y_d)	(0.2986, 0.3145)	(0.2894, 0.3043)
(x_w, y_w) 에 대한 (u'_w, v'_w)	(0.19422, 0.45745)	(0.18482, 0.45569)
(x_d, y_d) 에 대한 (u'_d, v'_d)	(0.19337, 0.45825)	(0.19062, 0.45098)
$\Delta u'v'$	0.00116 (2.32 MPCD)	0.00747 (14.94 MPCD)

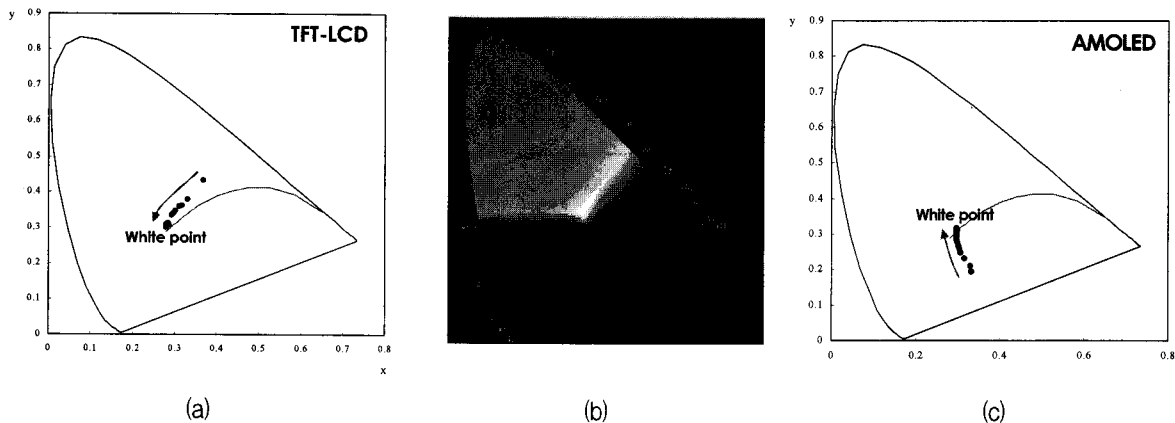


그림 3. 회색 계조의 색도도 ; (a) TFT-LCD, (b) CIE 색도도, (c) AMOLED

Fig. 3. Chromaticity diagram of gray scale; (a) TFT-LCD, (b) CIE chromaticity diagram, and (c) AMOLED.

마지막으로 $x_d y_d$ 좌표와 $x_w y_w$ 좌표를 다음 수식에 따라 $u'v'$ 좌표로 변환한 다음 색차 $\Delta u'v'$ 을 구한다.

$$\begin{aligned}
 (u'_w, v'_w) &= (4x_w, 9y_w) / (-2x_w + 12y_w + 3) \\
 (u'_d, v'_d) &= (4x_d, 9y_d) / (-2x_d + 12y_d + 3) \\
 \Delta u'v' &= \sqrt{(u'_w - u'_d)^2 + (v'_w - v'_d)^2}
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

표 1은 두 디스플레이의 백색을 측정한 색온도 좌표와 이를 기반으로 계산한 상관 색온도, 주광궤적 상의 색온도 좌표, $u'v'$ 좌표, $\Delta u'v'$ 색차를 요약하여 나타낸다.

표 1에서 보듯이 TFT-LCD의 상관 색온도가 AMOLED보다 높아 백색이 더 푸르스름하게 보이겠지만, AMOLED의 경우 주광 궤적과의 거리가 TFT-LCD 보다 가깝다는 것을 알 수 있다. 또한 $\Delta u'v'$ 색차에 있어서 TFT-LCD의 경우 0.00747로 0.004 이상임을 알 수 있다.

3. 회색 계조의 색도 일관성 및 감마 특성 평가

우리 눈이 느끼는 색감의 차이를 유발하는 주요 요소 중에는 휘도, 색온도, 감마 등이 있다. 하지만 LCD의 경우 백색의 색도와 회색들의 색도가 일정하게 유지되지 않는 특성이 있다. 백색과 회색 계조들의 색도가 일정한 정도를 평가하는 것을 ‘계조선형성(Grayscale linearity)’이라고 한다^[6]. LCD의 최대 약점 중 하나가 바로 이 계조선형성이 좋지 못하다는 것인데, 본 논문에서는 16개의 회색 패치(0부터 255까지 17단계씩 증가)에 대해 측정한 CIEXYZ 값에서 Black level의 CIEXYZ 값을 뺀 결과를 수식 (1)을 이용하여 xy 좌표로 변환한다. CIE 1931 xy 색도도 상에서 회색 계조들이 밝은 계조에서 어두운 계조로 갈수록 색도가 어떻게 변하는지 살펴보았다.

그림 3(a)의 그래프에서 보듯이 TFT-LCD의 경우, 회색 계조들의 색도가 어두운 계조로 갈수록 더 낮아지지만 주광 궤적 위에 존재하기 때문에 실제 전체적인 색감은 Yellow-Green 톤이 증가되어 탁해질 것임을 알 수 있다. 이에 반해 그림 3(c)의 AMOLED 경우, 어두운 계조로 갈수록 색온도는 주광 궤적 아래에 존재하게

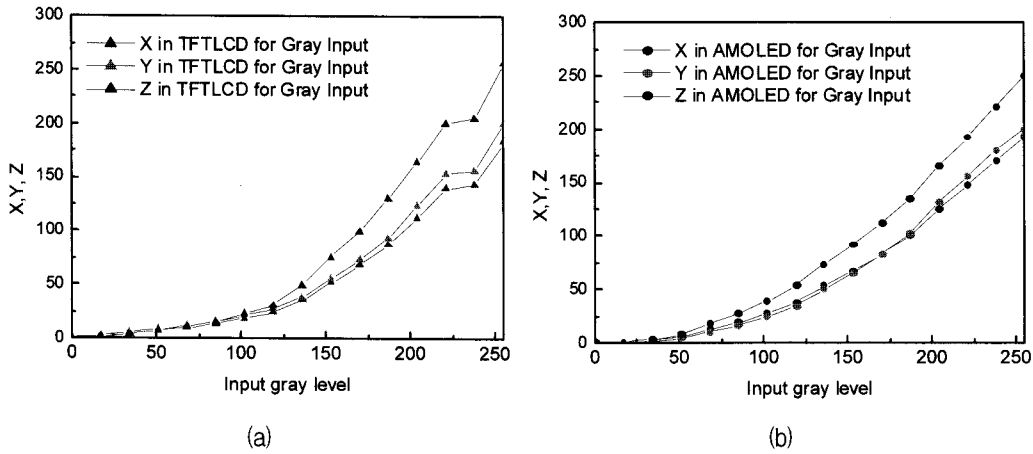


그림 4. 회색 계조의 감마 특성; (a) TFT-LCD, (b) AMOLED
 Fig. 4. Gamma characteristics of gray scale; (a) TFT-LCD and (b) AMOLED.

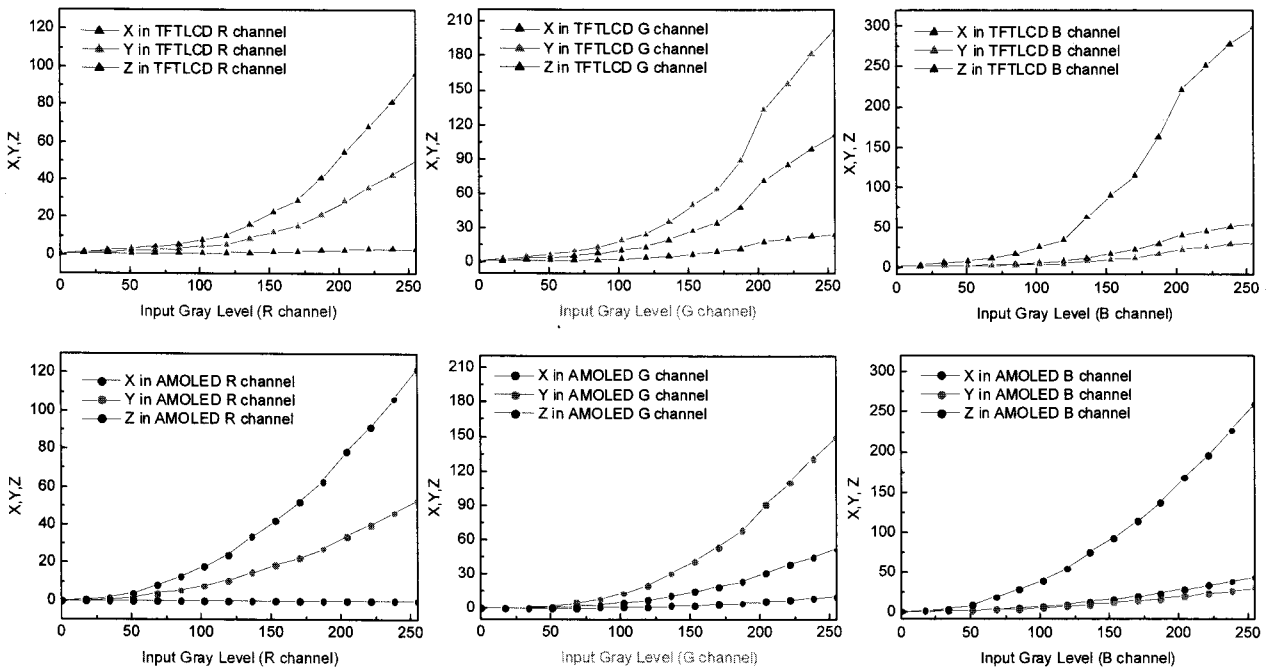


그림 5. RGB 채널별 계조의 감마 특성
 Fig. 5. Gamma characteristics of color scale for each RGB channel.

되고 순자주 궤적을 향하기 때문에 전체적인 색감은 불그스름한 톤을 가질 것으로 예상된다.

또한 본 논문에서는 256단계의 회색 계조들이 얼마나 매끄럽게 표현되는지를 평가하기 위해 그림 3에서 사용된 16개 회색 패치에 대한 휘도를 측정하여 XYZ의 감마 특성을 살펴보았다. 그림 4는 두 디스플레이에 대해 기준 감마 2.2에 대한 회색 계조의 XYZ의 감마 곡선을 나타낸 것이다. 일반적으로 감마가 작을수록 선형(linear)에 가까워져 전체적인 계조는 밝아지지만 색이 더 보이며, 감마가 커지면 곡선이 더 밀로 휘어져 전

체적으로 어둡지만 진한 색을 보여주게 된다^[6]. 그림 4(a)의 TFT-LCD의 경우, 어두운 계조에서는 기준 감마 2.2와 비슷한 곡선을 가지지만 밝은 계조에서는 감마 곡선이 S-모양을 나타내며 계조 특성이 불규칙한 부분이 있다. 이에 반해 그림 4(b)의 AMOLED는 초기의 목표 감마 설정 과정으로 인해 설정된 기준 감마 2.2와 거의 동일한 곡선을 가지는 것을 알 수 있다.

4. RGB 채널별 계조의 감마 특성 평가
 RGB 채널별로 디지털 입력에 대한 측정된 CIEXYZ

삼자극치를 이용하여 전기-빛 입출력 곡선을 모델링한 감마 특성을 그림 5에 나타내었다. Red 채널의 경우, TFT-LCD와 AMOLED 모두 감마 특성을 보이지만 중간 계조 영역에서 TFT-LCD의 감마 곡선이 밑으로 휘어져 AMOLED 보다 더 큰 감마를 가진다. 그러나 최대 입력값에 대한 CIEXYZ의 X 값이 AMOLED가 더 크다는 것을 알 수 있다. 이와 달리 Green과 Blue의 경우, 각각 최대 입력값에 대한 Y와 Z값이 TFT-LCD가 커지지만 전체적인 감마 곡선이 S-모양의 특성을 갖는다. 따라서 AMOLED가 256 단계에서 각 채널별로 어두운 색에서부터 밝은 색까지의 상대적인 밝기 비율을 잘 유지한다고 볼 수 있다.

5. 디스플레이의 색재현을 비교

디스플레이의 경우 휘도가 높을수록 즉 절대적인 밝기가 증가할수록 더욱 큰 자극을 주고 선명한 색으로 보여준다. 물론 휘도가 무조건 높다고 해서 좋은 것은 아니다. 눈부실 정도로 밝은 것은 의미가 없고, 절대적인 휘도가 높지 않더라도 주변 배경이나 조명 환경과 적절한 조화를 이루어야 한다. 이렇게 여러 가지 요소들이 함께 작용하여 색감을 좌우하게 되는데 이 중에서 채도의 정도를 색재현율(Color reproduction range)이라 하며, 디스플레이에서 색을 표현할 수 있는 능력을 수치로 표현한 것이다. 따라서 색재현율이 높을수록 더 많은 색상을 표현할 수 있고, 많은 색상을 표현한다는 것은 더욱 사실에 가까운 색을 낸다는 뜻이다. 국제조명학회(CIE)에서는 xy 색도 좌표를 주로 이용해 면적 비로 색역을 나타내지만, 'VESA FPDM 302-4A Gamut-area metric'에서는 균일 색 공간인 u'v' 색공간에서 RGB 삼원색에 대한 삼각형의 면적을 계산하여 디스플레이의 색역 크기를 비교한다. 이 때 다음 수식을 이용하여 RGB 삼원색의 u'v' 좌표값을 바탕으로 삼각형의 면적 A를 계산한다.

$$A = \frac{1}{2} | (u'_R - u'_B)(v'_G - v'_B) - (u'_G - u'_B)(v'_R - v'_B) | \quad (5)$$

그림 6은 TFT-LCD와 AMOLED의 RGB 삼원색의 u'v' 색도 좌표를 연결하여 만든 이차원 색역을 ITUR BT-709, SMPTE-C와 비교하여 보여주고 있다. TFT-LCD의 경우 ITUR BT-709, SMPTE-C와 비슷한 크기와 모양의 색역을 가지고 있어 표준 색재현 면

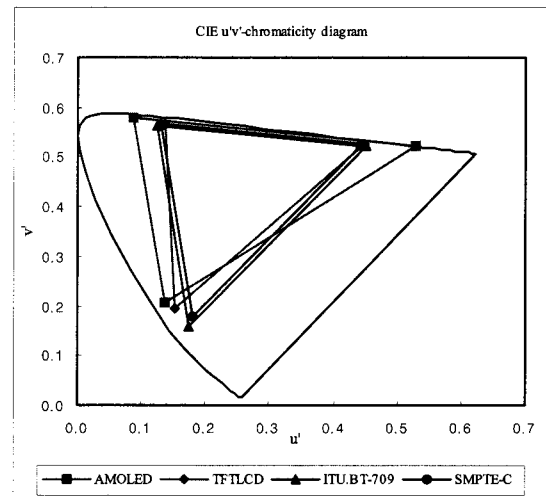


그림 6. CIE u'v' 색도도에서의 색역 면적
Fig. 6. Gamut metric in CIEu'v' chromaticity diagram.

표 2. u'v' 색도 좌표 및 색역 면적 A
Table 2. u'v' chromaticity coordinates and gamut area A.

		TFT-LCD	AMOLED	ITUR BT-709	SMPTE-C
u' 좌표	R	0.4490	0.5296	0.4507	0.4421
	G	0.1380	0.0886	0.1250	0.1294
	B	0.1519	0.1372	0.1754	0.1818
v' 좌표	R	0.5259	0.5205	0.5229	0.5211
	G	0.5659	0.5794	0.5625	0.5637
	B	0.1962	0.2077	0.1579	0.1790
색역 면적 A		29.30	41.24	33.24	30.23

표 3. 암실 명암비
Table 3. Darkroom contrast ratio.

두 디스플레이의 백색 휘도를 200cd/m ² 설정			
	블랙 휘도	백색 휘도	명암비
TFT-LCD	1.02	200.8	1:195
AMOLED	0.04	200.1	1:5000

에서 AMOLED보다 뛰어나며 AMOLED보다 Blue 영역에서 큰 색역을 가지고 있음을 알 수 있다. 하지만 Red, Green 영역에서는 TFT-LCD에 비해 AMOLED의 색역이 많이 크기 때문에 AMOLED의 Red, Green의 색상 및 채도가 더 진하고 선명하다고 할 수 있다. 표 2는 TFT-LCD, AMOLED, ITUR BT-709, SMPTE-C에 대한 u'v' 색도 좌표값과 색역 면적 A를 보여주고 있다.

6. 명암비(Contrast ratio)

화면상의 밝고 어두운 것 간의 대비를 뜻하는 명암비

는 쉽게 말해 디스플레이가 동시에 표현할 수 있는 가장 밝은 색과 가장 어두운 색의 폭으로 이해할 수 있다. 그래서 높은 명암비를 가진 디스플레이는 같은 어두운 색이라고 해도 미묘하고 세부적인 색상을 잘 표현한다. 특히 그림자와 같은 검은색을 표현할 때 그런 면이 두드러지게 된다. 낮은 명암비의 디스플레이는 예컨대 그림자가 회색빛에 가까워도 모두 검은색으로 나타날 수 있다. 반면 명암비가 높으면 검은 옷 위에 흘러내린 검은 머리카락과 같은 섬세한 표현이 가능할 뿐 아니라 밝은 색과 어두운 색의 구별력을 높여 주므로 가독성(Readability)을 향상시키게 된다^[6]. 명암비는 외부의 빛이 존재하는 상태에서의 명암 대비를 나타내는 명실 명암비와 외부의 빛이 없는 상태의 명암비를 말하는 암실 명암비로 구분된다^[8]. 본 논문에서는 'VESA FPDM 302-3 Darkroom contrast ratio of full screen'을 바탕으로 암실에서 전체 화면의 백색 휘도와 블랙 휘도를 측정하여 암실 명암비를 계산한다. 일반적으로 명암비는 블랙 휘도에 의해 크게 영향을 받게 되는데^[6], 본 논문에서는 두 디스플레이의 백색 휘도를 $200cd/m^2$ 로 동일하게 설정을 했기 때문에 블랙 휘도를 측정하여 명암비를 비교하여 표 3에 나타내었다. 그러나 두 디스플레이의 백색 휘도가 정확하게 $200cd/m^2$ 가 아닌 이유는 가변 저항 및 휘도 조절 변수가 민감하여 정확한 수치를 설정하기가 쉽지 않기 때문이다. 블랙 휘도를 비교해보면 TFT-LCD가 AMOLED보다 25배가 넘는 휘도 값을 가지기 때문에 암실 명암비에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

III. 디스플레이의 주관적 색재현 성능평가

디스플레이 장치는 서로 다른 색재현 특성을 가지고 있기 때문에 디스플레이 장치에 보여 지는 동일 영상에 대해서 인간은 각기 다른 느낌을 갖게 된다. 이는 화질을 평가하는데 있어서 시청자가 느끼는 주관적인 인지 화질이 얼마나 중요한가를 말해준다. 따라서 각 디스플레이가 갖는 고유의 색재현성을 주관적으로 평가하기 위하여 각 디스플레이의 동일한 설정 하에 영상을 재현한 후, 다수관측자를 통해 주관적인 색재현 성능, 느낌, 선호도 등을 조사하고, 이를 뒷받침하는 객관적 색재현 평가 결과와의 상관관계를 분석한다.

1. 실험 환경

주관적 평가를 위한 실험환경에서 두 디스플레이와

표 4. 실험 환경

Table 4. Experimental conditions.

항목	요구 조건	실험 환경
평가 거리	수직 화면의 5배 이상	30cm 이상 거리 Detail 평가 시 근접 관찰
평가 장소	300 - 700 lx	약 500 lx (낮 시간 사무실 환경)
평가 방법	동시 비교, 상대 비교 평가	동시 비교(정면 관찰) 상대 비교 평가(2중 1택)
피실험자	색채학 전공 (비)전문가 구별	비전문가(남:15, 여:8) 전문가(남:5, 여:1)
실험 시간	일정한 시간대 오전보다는 오후	오후 12시 - 4시
실험 설계	순서나 위치 고려	비교 대상의 제시 위치나 순서를 random으로 설정
패널 설정	동일 휘도	백색휘도를 $200cd/m^2$ 로 동일하게 설정

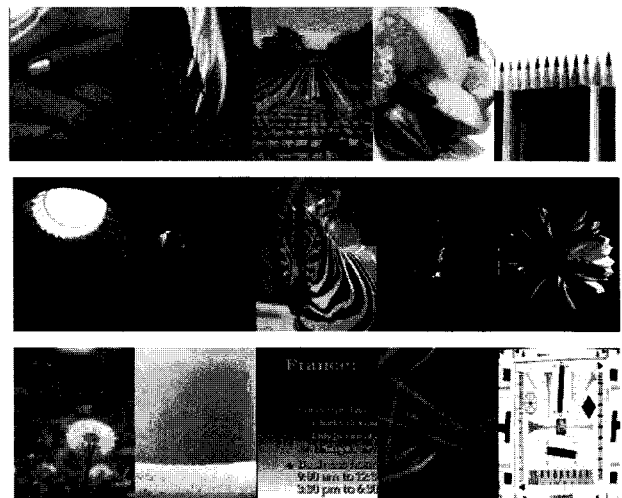


그림 7. 주관적 화질 평가를 위한 대표적인 실험 영상
Fig. 7. Representative test images for subjective image quality assessment.

관측자간의 거리는 디스플레이 수직 화면의 5배 이상으로 30cm 이상의 거리에서 관찰하였으나 섬세함(detail)을 평가할 때는 근접 관찰을 가능하도록 하였다. 평가 장소는 모바일 디스플레이의 사용 빈도가 잦은 낮 시간(일정한 시간대 : 오후 12시 - 4시)의 일반 사무실 환경(조도계로 측정 시 약 500 lx)에서 실험을 하였으며 실험 전 조명 조건에 순응하는 시간을 두었다. 실험 방법은 두 디스플레이의 시야각 및 시야 특성을 고려해서 두 디스플레이가 동시에 1인 관측자의 시야에 들어오도록 정면에서 관찰하였으며 다양한 실험 항목에 대해 상대 비교 평가 방법을 사용하였다. 즉, 다양한 평가 항목에 따라 선호하는 디스플레이를 선택하는 2중 1택 방법을 적용하였으며, 마지막에 관측자로 하여금 전체적인

색재현 느낌, 특성을 주관적으로 서술하도록 하였다. 실험에 참여한 관측자는 색채학 비전공자 23명(남 : 15명, 여 : 8명)과 전공자 6명(남 : 5명, 여 : 1명)이며 이들은 20대 초반에서 30대 초반의 나이 분포를 가지고 있다. 실험을 위한 두 디스플레이 패널은 백색 휘도를 200 cd/m^2 로 동일한 설정하였으며, 디스플레이의 위치나 테스트 영상의 순서에 의한 영향을 고려하여 임의로 위치나 순서를 변경하였다. 표 4에 요구되는 실험 조건과 실제 실험 환경을 정리하였다.

2. 주관적 화질 평가 및 상관관계 분석

디스플레이 장치에 대해 관측자가 느끼는 인지적 화질에 영향을 주는 요인 중에서 화질 평가에 필요한 대표적인 항목들을 중심으로 주관적 화질 평가를 수행하였다. 먼저 '원색 및 자연색을 재현 하는가'하는 관점과 '좀더 선명하고 진한 색을 표시함으로써 생생한 색을 재현 하는가'하는 관점에서 색재현성을 평가하였다. 이 실험을 위해서 그림 7에 있는 피부색, 하늘색, 잔디색, 과일색, 고채도색의 영상을 이용하여 관측자로 하여금 더 사실적이고 자연스러운 색을 재현해 내는 디스플레이와 더 선명하고 생생한 색을 재현해 내는 디스플레이를 선택하도록 하였다. 실험 결과 색채학 전공자와 비전공자 모두 TFT-LCD가 AMOLED 보다 자연색 재현이 뛰어나다고 판단하였으며, 특히 하늘색 재현에 있어서는 비전공자의 95% 이상이 TFT-LCD를 선택한 것으로 나타났다. 그리고 잔디색과 같은 Green색 계열의 경우, 비전공자는 TFT-LCD, 전공자는 AMOLED가 자연색을 더 잘 표현한다는 다소 상이한 결과를 보였다. 이에 반해 고채도색 영상을 이용한 실험에서는 전공자, 비전공자 모두 선명하고 진한 색 표현이 AMOLED가 TFT-LCD 보다 낫다고 하였다. 이러한 결과는 관측자의 기억색에 따라 선호하는 색이 달라질 수 있지만, 이는 디스플레이의 색재현율과 관계가 있다고 볼 수 있다^[6]. 인간의 눈은 높은 색재현율을 가질수록 강한 자극(높은 채도)을 느끼게 되며, 따라서 더욱 선명하고 진한 색감으로 느낀다. 디스플레이에서는 채도가 높아지면 원색과는 다른 색을 표현하게 되고, 이는 인공적인 색이 들어갈 수밖에 없기 때문에 자연색과는 멀어진 색을 표현하게 될 것이다^[6]. 특히 하늘색과 같은 Blue 계열의 영상에 대한 실험 결과는 그림 6에서 보는 바와 같이 TFT-LCD의 Blue 원색이 AMOLED보다 더 Blue 쪽에 위치에 있기 때문일 것으로 생각된다.

그 다음은 영상의 부드러운 색감 및 계조 표현에 대

한 실험이다. 이는 어두운 색에서부터 밝은 색까지의 상대적인 밝기를 얼마나 잘 나타내는가하는 문제로 그림 7에 있는 계단 영상을 이용하였다. 관측자로 하여금 어떤 디스플레이가 계단을 더 명확하게 구분하며 전체적으로 부드러운 계조를 표현하는가하는 질문에 전공자와 비전공자 모두 AMOLED가 뛰어나다는 결과를 보였다. 이는 디스플레이의 감마나 휘도, 블랙과 백색 근처 색들의 계조 표현력과 관계가 있을 것이다. 그림 4의 회색 계조에 대한 감마 특성을 비교해보면, TFT-LCD의 경우 어두운 계조에서는 기준 감마 2.2와 비슷한 곡선을 가지지만 곡선이 더 밑으로 휘어져 전체적으로 어둡기 때문에 계조 표현이 부족할 것이다. 또한 밝은 영역에 있어서도 감마 곡선의 불규칙한 부분이 있어 전체적으로 S 모양의 형태를 보이기 때문에 부드러운 감마를 가지는 AMOLED 보다 전체적인 색감 표현이 덜 부드러울 것이다.

미묘하고 세밀한 명암의 차이를 잘 표현하는 디스플레이는 흰색과 검정색의 표현이 보다 분명해진다. 이것은 검은 옷 위에 흘러내린 검은 머리카락과 같은 섬세한 표현과 눈 위를 뛰어다니는 흰 토끼처럼 같은 흰색이라도 더욱 강한 흰색을 제대로 표현하여 현실감을 잘 나타내는가하는 문제이다. 이 실험을 위해 그림 7에 있는 얼룩말, 돌계단, 흰 꽃, 민들레, 거품 영상을 이용하여 관측자로 하여금 블랙과 흰색의 표현이 보다 분명한 디스플레이를 선택하도록 하였다. 이는 같은 어두운 색, 밝은 색이라고 해도 세부적인 명암 차이를 잘 표현하는 디스플레이가 보다 나은 디스플레이일 것이다. 실험 결과, 어두운 영상의 세밀함 표현은 전공자, 비전공자 모두 AMOLED가 TFT-LCD보다 뛰어나다는 결과를 보였지만, 민들레나 맥주 거품 같은 밝은 영상의 경우 TFT-LCD가 AMOLED보다 더 미묘하고 섬세한 표현이 뛰어나다고 하였다. 이런 색재현 특성을 뒷받침할 수 있는 디스플레이의 특성은 블랙과 백색의 휘도에 의한 명암비일 것이다. 비록 암실에서 측정된 결과이긴 하나 표 3에 있는 암실 명암비에서 AMOLED의 블랙 휘도가 TFT-LCD보다 약 25배 정도 낮다는 것을 알 수 있다. 또한 이는 LCD의 구조적인 문제로 LCD는 액정 스스로 빛을 내지 못하고 패널 뒤에 있는 백라이트가 빛을 발산해 디스플레이가 작동하는 구조이기 때문에 검정색을 표현할 때도 백라이트는 계속 발광하고 있어서 블랙 휘도 특성이 AMOLED보다 떨어지게 된다. 하지만 백색 휘도는 두 디스플레이를 동일하게 200 cd/m^2 로 설정하긴 하였으나 대부분의 관측자들이

AMOLED가 TFT-LCD보다 밝게 느껴져서 오히려 세밀한 표현이 부족하다는 서술을 하였다.

마지막 평가 항목은 가독성이다. 모바일을 통한 디지털 콘텐츠뿐만 아니라 문자 전송 빈도가 높기 때문에 선명하게 문자를 표현한다는 것은 눈의 피로감을 줄이고 가독성을 향상시키게 된다. 가독성 평가와 함께 영상의 선명도(Sharpness) 평가를 위해 문자 영상과 거미줄, 차트 영상을 이용하여 관측자들에게 문자 표현뿐만 아니라 거미줄, 차트 표현이 선명하며 눈의 피로감이 덜한 디스플레이를 선택하도록 하였다. 전공자, 비전공자 모두 TFT-LCD가 가독성 표현에 있어서 AMOLED보다 뛰어나다는 결과를 보였지만, 거미줄, 차트 영상에 대해서는 AMOLED가 낫다는 상이한 응답을 보이기도 하였다. 가독성에 영향을 주는 디스플레이의 특성은 해상도(Resolution), 초점(Focus), 수렴성(Convergence), 외부 반사율(Reflectance), 투과율(Transmittance) 등이 있다^{[2],[6]}. 두 디스플레이의 해상도는 240x320으로 동일하지만, 다른 특성들에 대한 비교, 평가는 향후 연구 과제로 남아있다.

IV. 화질 개선 방향

주관적 화질 평가 결과를 뒷받침할 수 있는 디스플레이의 특성이 본문에서 언급한 것처럼 특정한 요소에만 국한되어 있지는 않다. 하지만 주관적 화질 평가와 정량적 결과와의 상관관계를 분석함으로써 향후 디스플레이의 화질 개선에 대한 방향을 제시해 줄 수 있을 것이다. 평가 결과 및 관측자들의 주관적 서술 내용을 바탕으로, TFT-LCD의 경우 사실적이고 자연스러움을 잘 표현하지만 어두운 색에 대해서는 탁하게 보이고 채도가 낮아 색상 표현력이 떨어진다는 의견이다. 이에 반해 LCD를 대체할 수 있는 차세대 디스플레이로 각광을 받고 있는 AMOLED는 전체적으로 밝고 선명해서 깨끗한 느낌을 주지만, 색이 과장되어 실제적인 느낌보다는 인위적이나 푸른색이 약해서 하늘색이나 바닷물 색 등이 부자연스럽다는 의견이다. 또한 화질 평가에 대표적인 색상인 피부색의 경우, 색의 단계보다는 색의 배합이 잘 이루어져야 하기에 화질 개선을 위해 고려해야 할 사항일 것이다. 일반적으로 색역이 넓은 디스플레이는 더 많은 색상을 표현할 수 있고 더욱 사실에 가까운 색, 고화질의 영상을 재현해 낼 수 있지만 이에 따른 색운영(Color management) 기술이 뒷받침 되어야지만 이러한 이점을 충분히 살릴 수 있을 거라 생각한다.

V. 결 론

본 논문에서는 휴대 단말기 디스플레이의 주류를 이루고 있는 TFT-LCD와 LCD를 대체할 차세대 디스플레이로 실용화 단계에 이른 AMOLED 간의 화질 평가를 수행하였다. 화질 평가에 위한 기준이 되는 디스플레이 특성들에 대해 VESA FPDM 2.0 표준에 기반하여 객관적으로 비교, 평가를 수행하였다. 또한 관측자가 느끼는 최종적인 인지 화질 평가를 위해 필요한 영상 및 항목을 선택하여 주관적인 화질 평가를 수행하고 이를 뒷받침할 수 있는 객관적 평가 결과와의 상관관계를 분석하였다. 이를 통해 색재현 측면에서 앞으로 모바일 디스플레이의 화질 개선을 위해 고려해야 할 방향을 제시하였다.

참 고 문 헌

- [1] 권지인, "제 4절 유기EL (OLED)," 정보통신산업동향, 2003년 5월.
- [2] www.displaybank.com
- [3] Perter G. J Barter, "Image quality of CRT displays," *SID Seminar M-2*, 1990.
- [4] K. M. Cho, J. H. Kim, J. N. Namgong, and H. S. Kim, "Image quality evaluation of CRT displays using SQRI method," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 11, no. 2, Apr. 2000.
- [5] VESA FPDM version 2.0 Standard.
- [6] www.monitor4u.co.kr
- [7] Gunter Wyszecki, "Color science: concepts and methods, quantitative data and formulas," Wiley, 1967.
- [8] Digital Times, www.dt.co.kr

저 자 소 개

박 태 용(학생회원)
대한전자공학회 논문지
제 41권 SP편 제5호 참조

이 철 희(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 41권 SP편 제1호 참조

하 영 호(정회원)
대한전자공학회 논문지
제 38권 SP편 제3호 참조