

다색광전달함수를 사용한 컬러 LCD 모니터의 광학적 상평가법

송중섭

(주)삼성전기 광사업부 광모듈사업팀 광모듈개발그룹
Ⓣ 443-743 경기도 수원시 영통구 매탄3동 314

조재흥[†] · 홍성목

한남대학교 이과대학 광·전자물리학과
Ⓣ 306-791 대전광역시 대덕구 오정동 133

이윤우 · 양호순 · 조현모 · 이인원

한국표준과학연구원 광도영상그룹
Ⓣ 305-600 대전광역시 유성구 도룡동 1

(2004년 10월 6일 받음, 2004년 12월 7일 수정본 받음)

컬러 LCD(liquid crystal display) 모니터의 광학적 상에 대한 성능을 평가하기 위하여 LCD 모니터를 포함한 모든 광학계의 파장별 공간주파수 반응에 가중치를 부여한 진폭전달함수(modulation transfer function ; MTF)를 이용한 다색광전달함수(polychromatic modulation transfer function ; PMTF)를 제안한다. 서로 다른 진폭들을 갖는 적색(R), 녹색(G), 청색(B)의 3개의 막대형 LCD 단위물체를 이용한 컬러 LCD의 PMTF의 시뮬레이션 결과와 실험적 결과가 잘 일치하며, 이 결과 컬러 LCD의 결상성능은 단색으로 측정하는 MTF 및 가시광의 전파장대를 사용하는 백색광 MTF와는 다른 R, G, B의 3색에 대한 PMTF로 측정하는 것이 보다 적절하다.

주제어 : color display, PMTF, three bar targets, LCD, image quality, spectral response, CCD.

I. 서 론

넓은 파장대를 갖는 조명 하에서 작동하는 광학 결상계들의 성능을 평가하기 위해서는 점확산함수(point spread function ; PSF)나 광전달함수(optical transfer function ; OTF)와 같이 이미 잘 알려진 단색광에 대한 평가함수를 다색광(polychromatic light) 영역으로 확장해야만 한다. 보통 이런 단색광에서의 평가함수를 다색광에서의 평가함수로 확대하는 방법은 상평가를 위한 실험장치에 들어가는 광원, 각종 광학부품들, 검출기의 단색 평가함수에 전파장에 걸친 스펙트럼 반응도(spectral response)를 고려한 파장별 적절한 가중치를 부여하여 이를 전파장에 걸쳐서 합치는 것이다.^[1,2] 특히 영상을 최종적으로 컬러로 보여주는 LCD(liquid crystal display), CRT(cathode ray tube), PDP(plasma display panel)와 같은 컬러 디스플레이 장치들은 단색을 내는 장치가 아니므로 측정 대상인 컬러 디스플레이뿐만 아니라 상을 평가하기 위하여 사용하는 여러 광학부품들의 스펙트럼 특성을 충분히 고려한 다색광으로 상을 평가해야만 한다.

최근에 널리 사용하는 컬러 LCD는 가볍고 두께가 얇다는 장점으로 인하여 기존의 CRT 모니터를 대신하여 컴퓨터 모니터를 대체하고 있으며 최근에는 중소형 컬러 텔레비전을

비롯한 대형 컬러 텔레비전의 디스플레이로 각광을 받고 있다. 지금까지는 일반적으로 LCD 모니터의 공간분해능(spatial resolution)은 모니터 설계 자료들을 사용하여 진폭전달함수(modulation transfer function ; MTF)를 계산함으로써 알 수 있었다.^[3] 이러한 진폭전달함수를 계산하는데 사용하는 식들에서 LCD 모니터의 백색 화소셋트의 광휘도(luminance) 분포형태를 직사각형으로 가정하였다. 그러나 실질적으로 이 분포형태는 완벽한 직사각형 형태는 아니지만 직사각형 형태로 가정하여도 개략적인 계산에서는 상당한 정밀도로 정확한 예측이 가능하게 해준다. 이러한 방법으로 LCD 모니터의 상에 대한 질적 평가를 할 때에는 대량생산시 발생하는 색잡음이나 광휘도의 불균일성과 같은 광특성으로 인하여 생기는 상의 질적 하락을 고려한 요소들을 필히 고려해야만 한다. 그러므로 지금까지는 컬러 LCD 모니터의 분해능은 이러한 상의 질적 하락을 일으키는 광학적 요소들에 대한 가중치를 고려한 모니터 상에 디스플레이되는 하나의 백색 단위도트의 진폭전달함수(modulation transfer function ; MTF)를 측정하여 구하였다.^[3,4]

그러나 컬러 LCD를 비롯한 컬러 디스플레이 장치들은 백색광이 아닌 여러 가지 색들을 디스플레이하며 이들은 적색(R), 녹색(G), 청색(B)이라는 3개의 기본단위 컬러화소들의 조합으로 재현되기 때문에 백색광의 MTF로 LCD 모니터의 분해능을 평가하면 안되고 이 3가지 기본 컬러화소들의 MTF

[†] E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

를 고려하여 계산한 다색광전달함수(polychromatic modulation transfer function ; PMTF)로 평가를 해야만 된다는 것을 알 수 있다. 즉 이들 LCD 각 기본 컬러화소들은 공간주파수별로 각기 다른 값을 가지고 있기 때문에 이들 기본 컬러화소들 사이의 각 MTF는 LCD 모니터의 상평가지 중요한 요소가 된다. 이를 위하여 이 논문에서는 컬러 LCD 모니터를 비롯한 컬러 디스플레이 장치들의 PMTF에 대한 수학적 표현에 대한 정의를 하고, 이 PMTF를 사용하여 컬러 LCD 모니터의 질적 상평가를 하는 방법을 제안하고자 한다. 이를 이용한 서로 다른 광의 진폭을 갖는 3개의 막대기형 물체^[5-7]를 사용한 LCD의 PMTF를 시뮬레이션하는 방법도 동시에 보여주하고자 한다. 그리고 이러한 컬러 LCD 모니터의 상을 평가하는 PMTF를 측정하는 장치의 원리와 이를 이용한 컬러 LCD 모니터의 PMTF 측정결과를 보여주고자 한다.

II. 컬러 LCD의 PMTF 이론

2.1. 광결상계와 컬러 디스플레이의 광학특성

OTF는 물체의 공간 스펙트럼 분포에 대한 광결상계의 공간주파수 필터링 효과로 정의할 수 있다. 이러한 OTF는 복소수 함수로 MTF를 나타내는 진폭과 위상전달함수(phase transfer function ; PTF)를 나타내는 위상으로 표현할 수 있다.^[8] 이 중에서 MTF는 수차와 회절에 의해서 발생하는 물체의 공간주파수 성분들의 진폭감소를 보여주는 것으로 해석할 수 있으며, PTF는 결상계 때문에 생기는 위상변화를 보여주는 것으로 해석할 수 있다.^[5] 이에 따라 광결상계의 MTF는 아래 식 (1)처럼 점확산함수(PSF)나 선확산함수(the line spread function ; LSF)의 푸리에 변환결과의 진폭으로 기술할 수 있다.

$$MTF(f, \lambda) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(\lambda, x) \exp(-j2\pi fx) dx \right| \quad (1)$$

여기에서 f 는 공간주파수를 의미하며, LSF는 다음과 같이 주어진다.

$$LSF(\lambda, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(\lambda, x, y) dy \quad (2)$$

PMTF는 광대역 파장을 갖는 광원으로 조명하는 광결상계의 분해능을 평가하는 기준이다. 그러므로 이러한 PMTF는 아래 (3)식과 같이 단색 MTF에 파장별 가중치인 $R(\lambda)$ 를 곱하여 파장대 내에서 모두 합한 값을 영의 공간주파수에 대한 값으로 규격화(normalization)하여 구한다.^[9]

$$PMTF_{optics}(f) = \frac{\int MTF(f, \lambda) R(\lambda) d\lambda}{\int MTF(0, \lambda) R(\lambda) d\lambda} \quad (3)$$

일반적으로 광결상계와는 달리 디스플레이 장치에서는 모든 색들은 3개의 기본 컬러화소인 R, G, B의 3가지 기본 색

의 조합으로 만든다. 그러나 이들 기본 3색은 각각이 완벽한 단색이 아니고 스펙트럼상에서 보면 각각 이들 색을 나타내는 중심파장에서 어느 정도의 파장폭을 갖는 넓은 선폭의 색들이다. 그러므로 단색 디스플레이 장치와는 달리 컬러 디스플레이 장치를 평가하기 위해서 이러한 파장폭을 갖는 3가지 기본 색들에 대한 컬러별 반응특성을 가지고 평가방법 및 평가기준을 만들어야만 한다.

이러한 평가기준을 위하여 디스플레이 상에서 R, G, B 채널들의 상대적 기여도를 분석하기 위해서 다음과 같이 R, G, B 채널들의 밝기를 256 단계로 나타내는 그레이 레벨(gray level)을 고려한 MTF를 기술할 수 있다.

$$MTF(f, l, m, n) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} LSF(l, m, n, x) \exp(-j2\pi fx) dx \right| \quad (4)$$

이 식 (4)에서 l, m, n 은 디스플레이 상에서의 R, G, B 화소의 그레이 레벨을 나타내는 각각의 정수들로 0에서 255까지이고 선확산함수 $LSF(l, m, n, x)$ 는 다음과 같이 점확산함수 $PSF(l, m, n, x, y)$ 의 적분으로 구할 수 있다.

$$LSF(l, m, n, x) = \int_{-\infty}^{+\infty} PSF(l, m, n, x, y) dy \quad (5)$$

그리고 마지막으로 컬러 디스플레이 장치의 광학적 성능을 평가하기 위하여 식 (4)로 주어진 디스플레이의 MTF에 전체 컬러에 대한 반응인 가중치 $R(l, m, n)$ 을 곱하여 영의 공간주파수에 대한 값으로 규격화한 디스플레이의 PMTF를 아래와 같이 표현한다.

$$PMTF_{display}(f) = \frac{\sum_l \sum_m \sum_n MTF(f, l, m, n) R(l, m, n)}{\sum_l \sum_m \sum_n MTF(0, l, m, n) R(l, m, n)} \quad (6)$$

여기에서 $R(l, m, n)$ 은 디스플레이의 전체 컬러반응(color response)이다.

2.2. LCD 모니터의 PMTF

LCD 모니터에서는 서로 다른 그레이 레벨을 갖는 3개의 직사각형 형태의 R, G, B의 3색 컬러화소가 임의의 색을 디스플레이한다. 그래서 이 컬러화소들의 서로간 상대적 위치에 따른 임의의 밝기를 나타내는 LSF는 그림 1로부터 다음과 같은 방정식의 표현을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} LSF(l, m, n, x) &= c + \text{rect}\left(\frac{x}{w}\right) \otimes [B(n) \times \delta(x+d) \\ &\quad + G(m) \times \delta(x) + R(l) \times \delta(x-d)] \\ &= c + B(n) \times \text{rect}\left(\frac{x+d}{w}\right) + G(m) \\ &\quad \times \text{rect}\left(\frac{x}{w}\right) + R(l) \times \text{rect}\left(\frac{x-d}{w}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서 l, m, n 은 앞서 식 (5)를 언급할 때와 마찬가지로 그레이 레벨을 나타내는 각각 0에서 255까지의 정수이다.

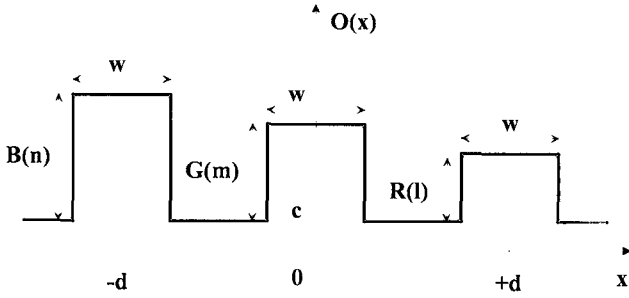


그림 1. 컬러 LCD 모니터의 다색광전달함수(PMTF)를 이론적으로 계산하기 위한 막대기형 적색(R), 녹색(G), 청색(B)의 기본 컬러화소들에 대한 1차원 사각함수 모델.

그리고 식 (7)에서 사용한 \otimes 기호는 수학적으로 컨볼루션(convolution)을 나타내며,^[10] w 는 하나의 컬러화소에 대한 폭이며, d 는 이 컬러화소의 이웃한 다른 컬러화소들까지의 거리로 화소의 중심에서 중심까지의 거리이고, $\delta(x)$ 는 디락(Dirac) 델타함수이다. 또한 $R(l)$, $G(m)$, $B(n)$ 은 각각 적색화소, 녹색화소, 청색화소의 복사조도를 그레이 레벨로 나타낸 것이다. 그리고 $rect(x)$ 함수는 아래와 같이 정의하는 사각형 함수이다.

$$rect(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x| < 0.5 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

식 (7)에서 사용한 상수 c 는 컬러 LCD 모니터에서 바탕으로 깔려있는 균일한 어두운 영역의 일정한 복사조도 값을 의미한다.

LSF에서 MTF를 구하는 식 (5)에서 절대값을 하기 전의 OTF 정의에 식 (7)의 LSF를 대입하면

$$\begin{aligned} OTF(f, l, m, n) &= \int_{-\infty}^{\infty} LSF(l, m, n, x) \times e^{-j2\pi fx} dx \\ &= c \times \delta(f) + w \times \text{sinc}(fw) \\ &\quad \times \{ B(n) \times e^{-j2\pi fd} + G(m) + R(l) \times e^{+j2\pi fd} \} \\ &= \text{Re}(f, l, m, n) + j \text{Im}(f, l, m, n) \end{aligned} \quad (9)$$

이 되며,^[10] 이 결과에서 싱크함수 $\text{sinc}(x)$ 와 마지막 식에서 나온 Re 와 Im 는 각각

$$\text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} \quad (10)$$

$$\text{Re}(f, l, m, n) = c \times \delta(f) + w \times \text{sinc}(fw) \times [G(m) + \{R(l) + B(n)\} \times \cos(2\pi fd)] \quad (11)$$

$$\text{Im}(f, l, m, n) = \{B(n) - R(l)\} \times w \times \text{sinc}(fw) \times \sin(2\pi fd) \quad (12)$$

이며, $\text{Re}(f, l, m, n)$ 와 $\text{Im}(f, l, m, n)$ 은 각각 복소수인 OTF의 실수부와 허수부를 의미한다. 컬러 LCD 모니터에 단일 컬러 화소가 디스플레이될 때 이 직사각형 화소의 길이 방향으로 주어지는 MTF는 다음과 같이 이들 식 (11)과 식 (12)로 주어진 실수부와 허수부의 제곱합의 제곱근으로 주어진다.

$$MTF(f, l, m, n) = \sqrt{\text{Re}(f, l, m, n)^2 + \text{Im}(f, l, m, n)^2} \quad (13)$$

식 (11)~식 (13)을 사용하면 아주 쉽게 백색에 대한 MTF가 $MTF(f, 255, 255, 255)$ 이라는 것과 R, G, B의 단일 세가지 컬러에 대한 MTF가 각각 $MTF(f, 255, 0, 0)$, $MTF(f, 0, 255, 0)$, $MTF(f, 0, 0, 255)$ 이라는 것을 알 수 있다. 그러므로 LCD 모니터에서 볼 수 있는 다양한 색들에 대한 LCD 모니터의 상을 질적으로 평가하기 위해서는 앞서 언급한 식 (6)과 식 (13)을 사용한다면 LCD 모니터에 대한 PMTF는 다음과 같이 다시 기술할 수 있다.

$$PMTF_{display}(f) = \frac{\sum_{l=0}^{255} \sum_{m=0}^{255} \sum_{n=0}^{255} MTF(f, l, m, n) R(l, m, n)}{\sum_{l=0}^{255} \sum_{m=0}^{255} \sum_{n=0}^{255} MTF(0, l, m, n) R(l, m, n)} \quad (14)$$

컬러 LCD 모니터의 컬러화소들의 폭과 주기 및 이들 화소들의 복사조도를 알 수 있다면 식 (11)~식 (14)로부터 한쪽 방향(x 방향)으로의 LCD 모니터의 PMTF를 이론적으로 구할 수 있다. 특히 식 (14)에서 디스플레이에 재현된 각 색(l, m, n)에 따른 색임의 스펙트럼이 파장반응인 $R(l, m, n)$ 이 된다.

III. 실험장치 및 방법

그림 2는 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 측정하기 위한 실험 장치의 개략도이다. 실험에 사용한 컬러 LCD 모니터는 국내에서 생산된 모니터(LG전자, FLATRON 563LS)이며 이 모니터는 그림에서 나타낸 것과 같은 x방향과 y방향으로 트랜스레이터로 이동하였다. 그리고 이 모니터의 직사각형 화소에 대한 복사조도 분포를 현미경 대물렌즈(MELLES GRIOT, $\times 4/0.12$)로 확대하여 냉각판(cold finger)위에 설치한 2차원 CCD(chage coupled device) 어레이 검출기(MICROMAX 782Y)에 결상하였다. 그리고 이 대물렌즈와 CCD 어레이 검출기가 연결된

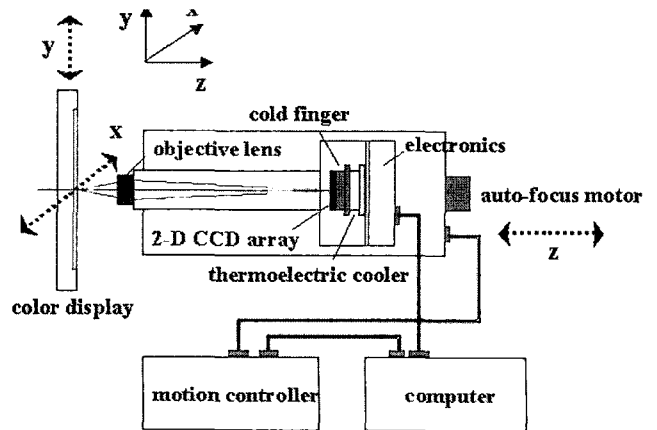


그림 2. 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 측정하기 위한 상분석기를 포함한 실험장치도.

PMTF 측정기인 상분석기(image analyzer) 몸체는 자동적으로 결상을 하기 위해서 auto-focus용 모터가 구동하는 자동 트랜스레이터 위에서 놓인 채로 광축을 따라 움직인다. 이 CCD 어레이 검출기에서 나오는 컬러 LCD 모니터의 컬러형태에 대한 신호들은 내장된 전자회로를 걸쳐서 컴퓨터에 인터페이스된 A/D 변환기를 통하여 12비트의 디지털 신호로 바뀌어 저장된다. 대물렌즈와 CCD 어레이 검출기의 MTF와 대물렌즈에 의한 배율을 고려하여 식 (4)~식 (6)으로부터 이들 단일 컬러화소 패턴의 LSF를 푸리에 변환하고 규격화함으로써 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 자동적으로 측정할 수 있다. 즉 이 광학계의 모든 컬러반응(color response)에 가중치를 부여한 MTF로부터 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 쉽게 계산할 수 있다. 이러한 컬러 LCD 모니터의 컬러반응을 구하기 위해서는 LCD 모니터의 3색 기본 컬러화소의 색좌표(x, y)들과 각각의 광휘도들은 분광광도계(spectroradiometer) (SPECTRO, 3200)로 측정하여 구하였다.

IV. 실험결과 및 논의

대부분의 컬러 LCD 모니터들은 각 화소(pixel)들이 자체의 TFT(thin-film-transistor) 능동스위치를 갖고있는 능동형 매트릭스 화소들을 갖는다. 컬러 LCD 패널상에 디스플레이된 하나의 컬러를 나타내는 이러한 화소들은 수직으로 정렬되어 있다.^[11] 그림 3은 그림 2의 실험장치로 관찰한 컬러 LCD 모니터 상의 균일한 백색을 보여주는 화소의 정렬상태를 보여주고 있다. 그림 3의 가운데 백색 네모안의 R, G, B의 화소 세트만을 1개 켄 상태를 그림 4에서 볼 수 있다. 그림 4에서 가운데 십자선이 지나가는 화소들의 가로방향 광휘도는 맨 아래에 일차원적으로 나타냈으며, 세로방향의 광휘도는 왼쪽에 나타내었다. 그리고 일련의 적색화소(R), 녹색화소(G), 청색화소(B)들 반복적 형태를 보여주기 위하여 각 직사각형 화소에 R, G, B의 글자를 표기하였으며, 중앙의 굵은 사각형에 백색을 나타내는 하나의 단위백색 화소세트를 나타내고 있다. 자세히 보면 각 화소들은 오른쪽 위의 구석과 아래쪽 중앙부분이 TFT 스위치가 설치된 곳으로 광휘도가 없는 곳이다. 그러나 전체의 형태는 대략 긴 직사각형 근사할 수가 있다는 것을 알 수 있으며 가로방향과 세로방향에서 폭과 간격만이 다르다는 것을 확인할 수 있으므로 본 실험에서는 가로방향의 측정치들만 가지고 PMTF의 이론 및 실험방법의 정당성을 확인하고자 하였다. 모든 모니터 상의 색은 근본적으로 이들 3개의 기본화소들의 상대적 광휘도의 합성으로부터 구할 수 있다. R, G, B의 단일 기본화소만을 가지고 백색(3개의 기본 화소가 모두 켜짐), 청색(청색화소만 켜짐), 녹색(녹색화소만 켜짐), 적색(적색화소만 켜짐)을 보여주기 위하여 각각의 기본화소들을 하나씩 켜놓은 화면을 찍은 것이 그림 4이다. 이로부터 가로방향의 화소들의 폭이 $w = 80 \mu\text{m}$ 이고 화소들 간의 간격인 $d = 108 \mu\text{m}$ 이라는 것을 알 수 있다. 이러한 수치들은 식 (7)~식 (14)의 컬러 LCD 모니터의

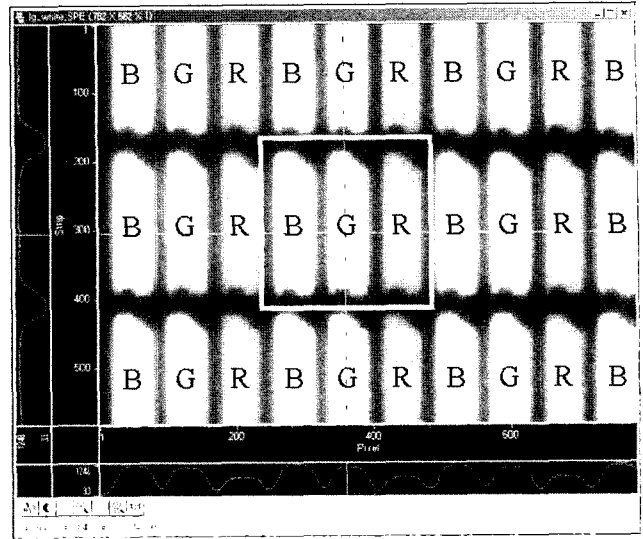


그림 3. 컬러 LCD 모니터의 백색에 대한 화소들의 배열 상태.

PMTF 모델을 사용한 이론을 계산하는 데에 사용하였다.

그림 5는 분광광도계로 국내의 3개 회사에서 생산되는 컬러 LCD 모니터의 기본 3색에 대한 삼각형 색도좌표를 측정하여 국제조명위원회(CIE) (x, y) 색도체계에서 나오는 말굽형 색도좌표에 겹쳐 그려 놓은 것이다. 이로부터 3사의 모델이 모두 CIE 색도좌표계를 만족하고 있으며 색도자체는 3사가 거의 비슷함을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 (a)사 컬러 LCD 모니터만을 기준으로 실험하였다. 그림 6은 분광광도계를 이용하여 측정된 LCD 모니터의 파장별 복사조도 분포를 보여주는 것으로 굵은 선은 적색화소에서 나오는 적색파장이고, 굵은 점선은 녹색화소에서 나오는 녹색파장이며, 가는 점선은 청색화소에서 나오는 청색파장이다. 이로부터 R, G, B의 단색화소들에서 나오는 단색들은 단일 파장이 아닌 파장 폭을 갖는 광원임을 알 수 있고, 이러한 이유 때문에 식 (6)을 사용하여 단일 컬러인 R, G, B에 대한 MTF나 백색광의 MTF를 구할 때, 또는 이들의 조합에 의한 여러 색들의 평균적 개념의 PMTF를 구할 때 파장별 파장반응인 $R(l, m, n)$ 은 그림 6의 결과를 사용한다.

식 (4)~식 (6)의 컬러 디스플레이의 PMTF 이론을 사용하여 상분석기로부터 구한 결과를 처리하여 얻은 컬러 LCD 모니터의 PMTF 결과는 상분석기의 대물렌즈의 MTF와 2차원 CCD 어레이 검출기의 MTF가 포함된 값이므로 이들 MTF값들로 측정하여 얻은 PMTF를 나누어 주어야 한다.^[12] 그림 7은 이러한 상분석기가 갖는 MTF를 0-10 lp/mm까지 측정된 결과이다. 10 lp/mm까지만 측정된 이유는 컬러 LCD 모니터의 PMTF가 10 lp/mm에서 0.3 이하로 낮아지므로 이 공간주파수면 PMTF의 관찰에 충분하기에 이 값까지만 측정된 것이다. 이러한 그림 7과 같은 상분석기의 MTF는 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 구하는데 보정값으로 사용하여 측정된 PMTF를 나누는데 사용한다. 이 값은 나이퀴스트 주파수(Nyquist frequency)인 5 lp/mm보다 작은 공간주파수에서 조차도 0.9

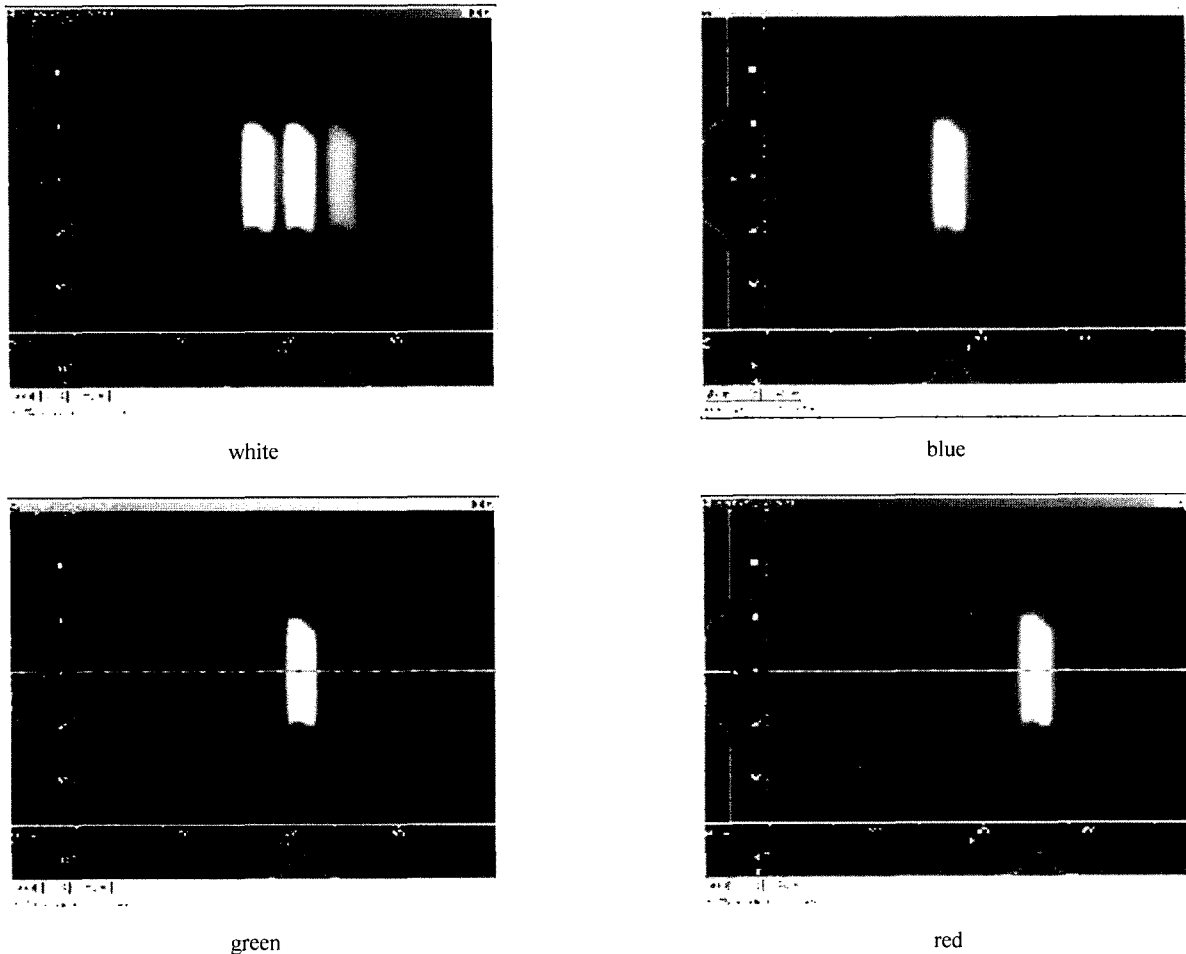


그림 4. 컬러 LCD 모니터의 R, G, B 한 세트의 기본 컬러화소에 대한 모양 및 각각의 복사조도로 위쪽에서부터 백색(white), 청색(blue), 녹색(green), 적색(red)임.

이상의 MTF를 갖기 때문에 이 상분석기에 의한 PMTF값의 하락은 매우 작다는 것을 알 수 있다.

그림 8은 그림 6과 그림 7의 결과들을 이용하여 R, G, B 기본 컬러화소로 만든 임의의 3가지 색의 조합중 2가지만으로 섞어서 만든 (a) 노랑색(yellow), (b) 청록색(cyan), (c) 짙은 분홍색(magenta) 화소에 의한 각각의 MTF를 구한 것이다. 식 (4)~식 (6)에서 언급한 3가지 기본 컬러화소의 그래이 레벨인 (l, m, n)으로 보면 노랑은(0, 255, 255)이고, 청록색은 (255, 255, 0)이며, 짙은 분홍색은(255, 0, 255)이다. 각 그림의 왼쪽은 그림 2의 상분석기로 찍은 컬러 LCD 모니터의 R, G, B 컬러화소 셋트 1개를 대상으로 측상에서 보았을 때 막대형 화소의 수평축상의 밝기를 보여주는 것이며, 이를 이용하여 0-10 lp/mm까지 구한 MTF가 오른쪽에 나와 있다. 이들은 1가지 색에 대한 정보이므로 PMTF라는 용어 대신에 MTF라는 용어를 사용하였다. 그리고 각각의 결과들의 아래 결과는 각 공간주파수에서의 MTF 값을 정량적으로 보여주는 것이다. 노랑색과 청록색의 막대기형 화소들간의 간격과 폭이 그림에서 보듯이 매우 유사하므로 이들의 푸리에 적분 결과로 나타나는 MTF도 역시 매우 유사하다. 그러나 짙은

분홍색은 두 기본 컬러화소간의 간격이 넓기 때문에, 즉 모양이 앞서의 2가지 색들과는 다르게 배치되어 있으므로 이들의 푸리에 적분결과는 앞서의 2가지 색들과 다르게 10 lp/mm까지 MTF가 높게 나타난다.

그림 9는 그림 6과 그림 7의 결과들을 이용하여 식 (4)~식 (6)으로 구한 컬러 LCD 모니터의 측상이면서 수평축 방향의 PMTF 측정값(실선들)과 그림 4의 결과로부터 구한 컬러화소의 폭과 간격을 이용하여 식 (9)~식 (14)의 컬러 모니터에 대한 PMT의 이론식으로부터 구한 이론값(점선들)을 비교하여 놓은 것이다. 측정값들만 보면 그림 9(a)는 3개의 단일 컬러화소들에 대한 측정된 MTF 중 적색화소에 대한 것으로 적색화소와 청색화소 및 녹색화소의 경우 5% 이하로 일치하는데 그림에서 보듯이 9 lp/mm까지의 공간주파수에서 0.3 이상의 MTF로 측정된다. 그림 9(b)의 측정값은 그림 8과 같이 모든 컬러들을 다 고려하여 식 (4)~식 (6)을 이용한 PMTF로 (a)의 경우보다는 MTF값의 크기가 작음을 알 수 있다. 또한 그림 9(c)의 측정값은 R, G, B의 3색 기본 화소를 모든 권 상태인 백색광에 대한 MTF로 그 값이 매우 낮다. LCD 모니터의 각 컬러성분들의 MTF는 (a)와 (b)의 측정값

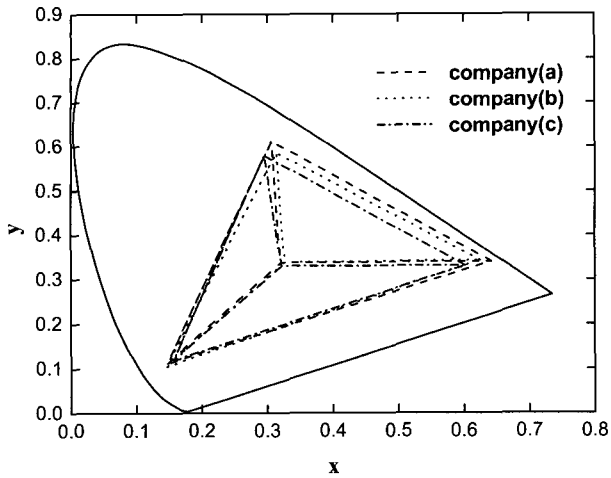


그림 5. 국내 컴퓨터 모니터 생산 3개 업체에서 생산한 컬러 LCD 모니터에 대한 R, G, B의 3가지 기본색에 대한 color-triangle을 겹쳐서 그린 CIE(x,y) 색도좌표계.

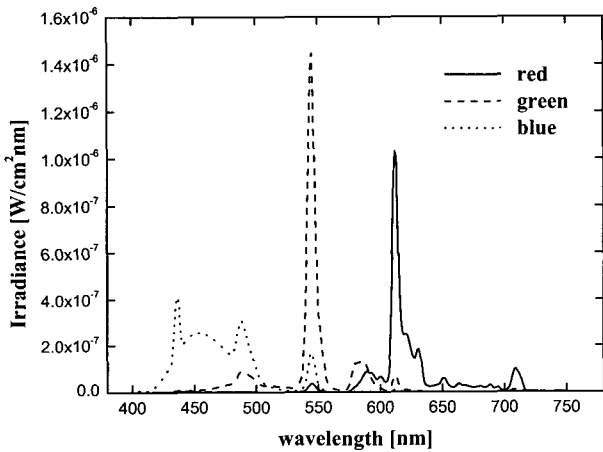


그림 6. 그림 5의 (a)사 제품에 대한 컬러 LCD 모니터의 R, G, B 기본색에 대한 파장별 분광분석 결과.

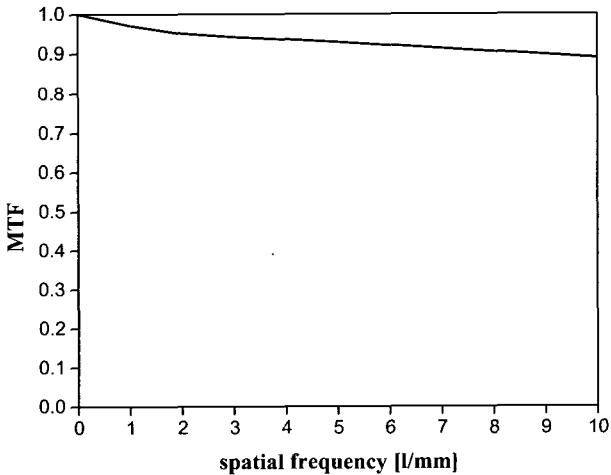
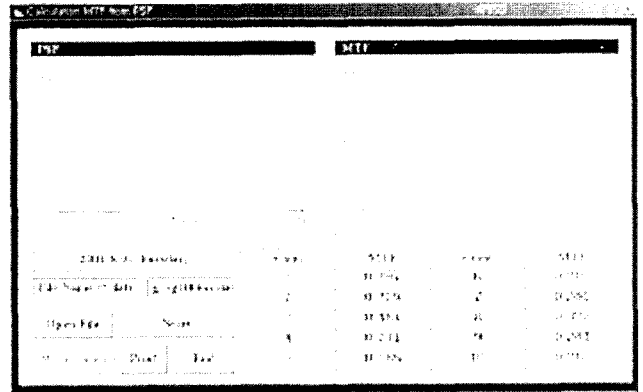
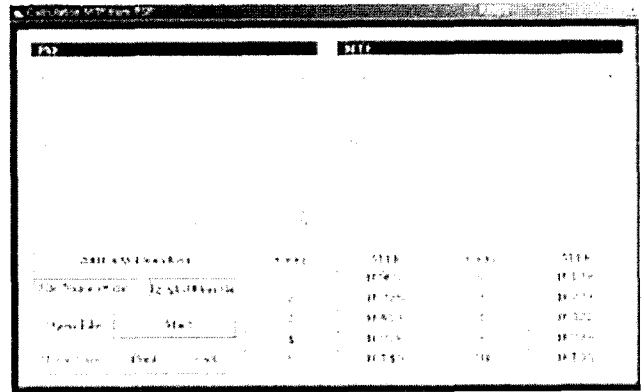


그림 7. 그림 4의 실험장치에 나타난 2차원 CCD와 대물렌즈로 구성된 상분석기의 MTF.

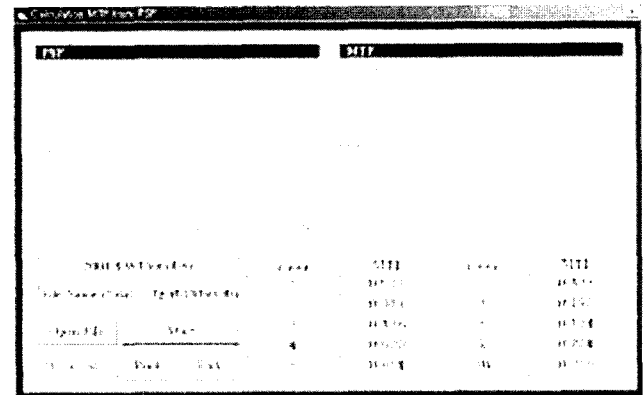
사이에서 서로 다른 MTF를 나타내게 된다. 이러한 실험적 결과로부터 보통 우리가 말하던 백색광 MTF와는 다른 PMTF를 고려해야만 제대로 된 컬러 LCD 모니터의 MTF값을 읽을 수 있음을 알 수 있다. 그리고 이론식인 식 (9)~식 (14)를 이용하여 계산한 이론과 비교하여도 그 추세는 정성적으



(a)



(b)



(c)

그림 8. R, G, B의 3가지 기본색들중 2개의 조합으로 이루어진 3가지 색들에 대한 화소들의 복사조도 분포와 이를 이용하여 측정된 MTF. (a) 노랑색($(l, m, n) = (0, 255, 255)$), (b) 청록색($(l, m, n) = (255, 255, 0)$), (c) 짙은 분홍색($(l, m, n) = (255, 0, 255)$).

로 상당히 일치함을 알 수 있다. 즉 컬러 LCD 모니터의 축상 및 수평축에서의 PMTF는 R, G, B 3개의 기본 컬러화소들의 폭, 간격, 그레이 레벨들이 주어진 막대형 컬러화소들의 푸리에 변환을 모두 합해서 규격화한 결과로 이해할 수 있다. 그러므로 컬러 LCD 모니터의 MTF 백색광의 MTF보다는, 그리고 특정 단색 컬러의 MTF만을 가지고 평가하기보다는 모든 컬러화소들의 각종 컬러들에 대한 MTF를 고려한 PMTF로 평가해야 함을 알 수 있다.

그림 10은 컬러 LCD 모니터의 수평방향의 PMTF를 광축을 포함하여 10도 단위로 좌측으로 10도(L10), 20도(L20), 30도(L30), 40도(L40), 우측으로 똑같이(R10, R20, R30, R40) 상분석기를 회전시켜서 좌우 비축상에서의 PMTF 값의 좌우

대칭을 알아보고자 3 lp/mm까지 측정된 비축상의 PMTF들의 측정 결과이다. 굵은 실선이 축상에 대한 PMTF이며, 각 점선들이 각각의 좌우 비축상에서의 PMTF들에 대응한다. 그림에서 보듯이 비축상에서 보면 3가지 기본 컬러화소의 폭이 좁아지면서 이들 간의 간격의 구분이 점차로 약해지므로 PMTF의 값은 축상 PMTF와는 달라지며 일반적으로 좌우 각도가 작은 경우가 좌우 각도가 큰 경우보다 저주파 영역에서는 PMTF가 작다가 다시 커지는 경향을 갖고 반대의 경우는 반대의 경향을 보임을 알 수 있다. 특히 좌우의 대칭적 위치에서 PMTF가 다르게 측정되는 것은 막대기형 화소의 형태가 그림 3과 그림 4에서 보듯이 완벽한 직사각형이 아닌 오른쪽 상단 부분이 없는 비대칭형이기 때문에 이들 화소를 좌우로 돌려서 볼 경우 폭의 변화가 서로 다르기 때문이다. 이러한 그림 10의 결과로부터 알 수 있듯이 컬러 LCD 모니터의 PMTF를 측정하는데 있어서 좌우 비축상에서의 값이 축상에서의 값과 매우 다르므로 이들도 LCD 모니터의 상평가시 고려해야만 한다는 것이다. 앞으로 수평축에서 구한 이들의 결과들은 수직축에서도 구할 것이며, 컬러 LCD 모니터의 시뮬레이션에서 사용한 사각함수 모델을 비대칭 화소모양에 따른 수직축에 따라 변형된 사각함수들의 모델로 적절히 바꾸어 정량적으로도 일치하는 컬러 LCD 모니터의 PMTF 이론을 개발하고자 한다.

V. 결 론

컬러 LCD(liquid crystal display) 모니터의 광학적 상에 대한 분해능 성능을 평가하기 위해서 실험적으로 측정된 컬러 LCD 모니터의 R, G, B의 3색 기본 컬러화소에 의한 다양한 컬러들에 대한 광학계의 파장별 공간주파수 반응에 가중치를 부여한 진폭전달함수(modulation transfer function ; MTF)로부터 계산한 다색광전달함수(polychromatic modulation transfer function ; PMTF)를 제안하였으며 이를 이용한 실험을 하였다. 이 결과 컬러 LCD 모니터의 결상성능은 0-10 lp/mm의 공간주파수에 대해서 단색으로 측정하는 MTF가 가장 좋았으며, 백색광 MTF가 가장 낮았다. 반면에 R, G, B의 각 기본 컬러화소에 대하여 대하여 256 그레이 레벨들에 대한 조합으로 나타나는 모든 파장별 컬러들에 대한 PMTF를 규격화한 값은 이들 단색 컬러화소에 대한 MTF와 백색광 사이의 값을 가짐을 알 수 있으므로 컬러화소로 구성되는 LCD 모니터의 상평가는 단색 컬러화소들만에 의한 MTF 및 가시광의 전파장대를 사용하는 백색광 MTF와는 다른 R, G, B의 3색에 대한 PMTF로 측정해야만 한다는 것을 알 수 있었다. 이러한 PMTF는 서로 다른 진폭들을 갖는 적색(R), 녹색(G), 청색(B)의 3개의 막대형 LCD 단위물체를 이용한 컬러 LCD의 PMTF의 이론을 만들어서 시뮬레이션한 결과, 컬러 LCD 모니터의 실험적 결과와 그 정성적 양상이 잘 일치하는 것으로 보아서 컬러 LCD 모니터의 PMTF는 막대기형의 R, G, B 기본 컬러화소들의 폭과 간격 및 그레이 레벨들에 의해서 주어

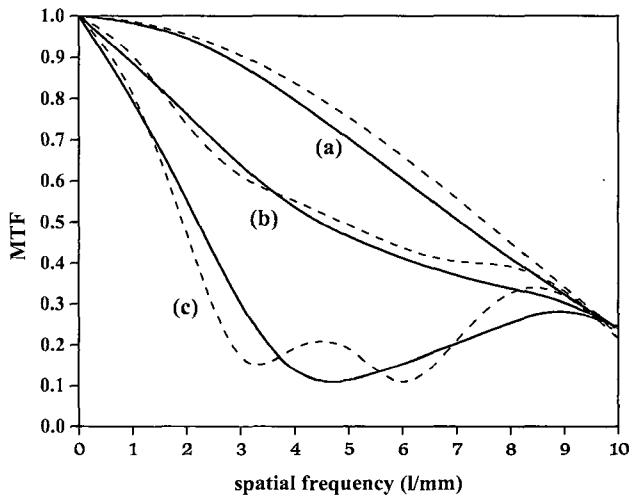


그림 9. 컬러 LCD 모니터의 축상이면서 수평축 방향의 PMTF 측정값(실선들)과 PMT의 이론식으로부터 구한 이론값(점선들)을 비교한 결과. (a) 단색 컬러에 대한 MTF, (b) PMTF, (c) 백색에 대한 MTF.

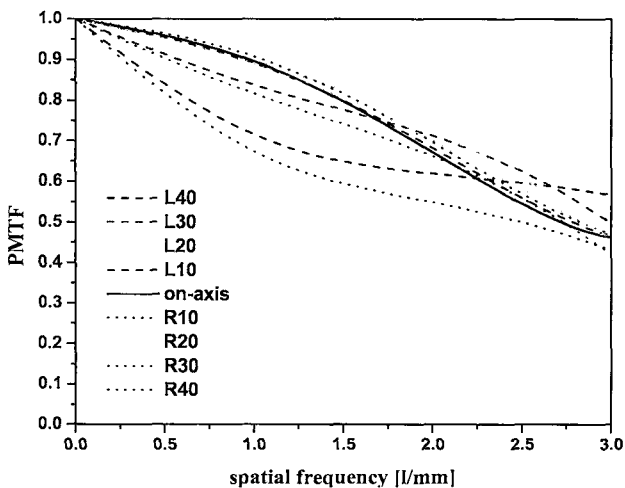


그림 10. 컬러 LCD 모니터의 비축방향에 대한 PMTF. 굵은 실선이 축상에 대한 PMTF이며, 각 점선들이 각각의 좌우 비축상에서의 PMTF들에 대응함.

짐을 알 수 있었다. 이러한 PMTF는 비축상에서 축상과는 다른 값을 보여주며 좌우 비축상에서 비대칭의 PMTF를 보여 준다. 본 연구에서는 컬러화소들의 형태가 직사각형의 막대기 형태로 대략적 추정하였기에 모니터의 수평축에 대한 PMTF만을 측정하였으나 수직축에 대해서도 비슷한 양상을 갖을 것이라고 추측되며, 앞으로는 컬러 LCD 모니터의 시뮬레이션에서 사용한 사각함수 모델을 비대칭 화소모양에 따른 수직축에 따라 변형된 사각함수들의 모델로 적절히 바꾸어 정량적으로도 일치하는 컬러 LCD 모니터의 PMTF 이론을 개발하고자 한다.

참고문헌

- [1] R. Barnden, *Optica Acta*, "Calculation of axial polychromatic optical transfer function," *Optica Acta*, vol. 21, no. 12, pp. 981-1003, 1974.
- [2] W. D. Furlan, G. Saavedra, E. Silvestre, P. Andres, M. J. Yzuel, "Polychromatic axial behavior of aberrated optical systems: Wigner distribution function approach," *Appl. Opt.*, vol. 36, no. 35, pp. 9146-9151, 1997.
- [3] T. H. Kim, Y. W. Lee, I. W. Lee, and S. C. Choi, "Optimization of resolution and color reproduction by controlling luminance and contrast levels of a liquid-crystal display monitor," *Appl. Opt.*, vol. 39, no. 13, pp. 2054-2058, 2000.
- [4] T. H. Kim, Y. W. Lee, H. M. Cho, and I. W. Lee, "Evaluation of image quality of color liquid crystal displays by measuring modulation transfer function," *Opt. Eng.*, vol. 38, no. 10, pp. 1671-1678, 1999.
- [5] D. N. Sitter, J. S. Goddard, and R. K. Ferrell, "Method for the measurement of the modulation transfer function of sampled imaging systems from bar-target patterns," *Appl. Opt.*, vol. 34, no. 4, pp. 746-751, 1995.
- [6] G. D. Boreman and S. Yang, "Modulation transfer function measurement using three- and four-bar targets," Supplement to *Applied Optics*, pp. 8050-8052, 1995.
- [7] R. L. Lucke, "Deriving the Coltman correction for transforming the bar transfer function to the optical transfer function (or the contrast transfer function to the modulation transfer function)," *Appl. Opt.*, vol. 37, no. 31, pp. 7248-7252, 1998.
- [8] Joseph W. Goodman, "Introduction to Fourier Optics; 2nd ed." (McGRAW-HILL, Singapore, 1996) pp. 137-139.
- [9] O. P. Nijhawan, P. K. Datta, and C. R. Sharma, "MTF of proximity-focused imaging tube in polychromatic light," *Appl. Opt.*, vol. 14, no. 2, pp. 509-512, 1975.
- [10] Jack D. Gaskill, "Linear Systems, Fourier Transforms, and Optics" (John Wiley & Sons, New York, 1978) pp. 150-178.
- [11] G. Spekowius, M. Weibrecht, P. Quadflieg, and H. Reiter, "Image quality assessment of color monitors for medical soft-copy display," *Proceedings of SPIE*, 3658, 280-290, 1999.
- [12] 이지영, 송종섭, 조재홍, 장수, 암천석, 이윤우, 이인원, "카메라 렌즈 평가용으로 제작된 nodal slide식 실시간 OTF 측정장치," *한국광학회지*, 제 13권 2호, pp. 92-97, 2002.

Image quality assessment of color LCD monitors by polychromatic modulation transfer function

Jong Sup Song

Optical Module R&D Group, Optics Division, Samsung Electro-mechanics Co. Ltd., 443-743, Korea

Jae Heung Jo[†] and Sung Mok Hong

Dept. of Physics, Hannam University, Taejon 306-791, Korea

[†]E-mail: jhjo@hannam.ac.kr

Yun Woo Lee, Ho Soon Yang, Hyun Mo Cho, and In Won Lee

Photometry & Imaging Optics Group, Korea Research Institute of Standards and Science, Taejon 305-600, Korea

(Received October 6, 2004, Revised manuscript December 7, 2004)

We propose a method for evaluating the image quality of color liquid crystal display(LCD) monitors by using the polychromatic modulation transfer function(PMTF), which is calculated from the modulation transfer function(MTF) weighted by the overall color response of the system including the test LCD monitor. We confirm that experimental results using the PMTF agree well with simulated results of the PMTF of a color LCD monitor by using three bar targets with different amplitudes and three elementary colors such as red(R), green(G), and blue(B). As a results, we should choose the PMTF instead of the white color MTF or monochromatic MTF in order to evaluate correctly the image quality of color LCD monitors.