

## SQRI법에 의한 CRT 디스플레이의 화질 평가

조경미 · 김정희 · 남궁지나 · 김현수

삼성SDI주식회사 Corporate R&D Center

(1999년 12월 14일 받음, 2000년 3월 17일 수정본 받음)

CRT디스플레이의 화질 평가에는 휘도, 콘트라스트, addressability, 시정거리 등의 다양한 물리적 특성치가 사용된다. 그러나, 최종적인 CRT디스플레이 화질의 비교·평가는 물리적 특성치가 아닌 실제 사용자가 느끼는 화질 즉, 주관적 인지 화질에 의해 이루어진다. 본 논문에서는 4종류 CRT모니터의 SQRI(Square Root Integral) 값과 다수의 피험자에 의한 주관적 화질 평가 점수와의 상관성이 비교되었다. 그리고, 이러한 SQRI법의 주관적 화질 평가 척도로서의 타당성을 바탕으로 모니터의 다양한 물리적 특성치가 주관적 화질에 미치는 영향이 검토되었다.

### I. 서 론

CRT 디스플레이의 화질은 전자빔 분포, 새도우마스크 간격, 콘트라스트, 휘도, 화면 크기와 같은 특성들에 의해 결정된다. 그러나, 이러한 물리적 특성들이 수치적으로 표현된다고 할지라도, 실제 사용자가 느끼는 화질 즉, 주관적 화질(Subjective Image Quality)에 미치는 물리적 특성들의 영향을 결론짓는 것은 어려운 일이다. 디스플레이의 최종적인 주관적 화질을 알기 위해서는 이러한 물리적 데이터와 인간 시각계의 심리물리학적(Psychophysical) 양상을 연결시켜줄 필요가 있다. 이러한 연결은 Peter G.J. Barten에 의해 제안된 SQRI(Square Root Integral)법<sup>[1]</sup>을 사용하여 이루어질 수 있다. 이 방법은 처음에는 주관적 화질에 미치는 분해능의 효과를 나타내기 위해 고안되었으나, 나중에 휘도, 콘트라스트, 화면크기, 시정거리등의 디스플레이 변수들의 효과를 나타내는데 까지 확장되었다. SQRI법에 의해 계산된 결과는 실제 주관적 화질과 높은 상관관계가 있음이 여러 실험들에 의해 증명되었다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 SQRI의 주관적 화질 평가 척도로서의 타당성을 재검토하고, 이를 바탕으로 디스플레이의 물리적 특성들이 SQRI에 미치는 영향을 평가하였다. 그러나, 이 방법의 단점은 색감은 평가할 수 없다는 것에 있으며, 향후 색감을 포함한 개념의 주관적 화질 평가 척도가 마련되어야 할 것으로 생각된다.

### II. 주관적 화질 평가를 위한 척도

#### 2.1. 디스플레이의 MTF

광학 시스템의 질을 이해하는 고전적인 방법은 분해능을 평가하는 것이다. 분해능이 높을 수록 시스템은 보다 좋은 질을 가지고 있다고 할 수 있다. 이 분해능에 해당하는 것이 MTF이다. 즉, 디스플레이에서의 MTF란 Modulation Transfer Function의 약어로서 디스플레이가 어떤 일정 주기에 의해 반복되는 휘도 패턴을 얼마나 잘 재생할 수 있는 가를 의미한다. 이 MTF에 영향을 주는 요인으로서 전자빔 분포, 새도우

마스크 간격등을 들 수 있다. 최종적인 디스플레이의 MTF는 각각의 MTF의 곱으로 나타낼 수 있다.

빔의 MTF 평가는 2차원적 전자빔 분포의 푸리에 변환에 의해 이루어질 수 있다.<sup>[1]</sup> 전자빔 분포를 가우시안 분포로 가정하면, 빔의 MTF는 5% 빔경 또는 50% 빔경을 이용하여 근사할 수 있다.

5% 빔경을 이용할 경우, 빔의 MTF<sup>[3]</sup>는

$$MTF_{spot}(u) = \exp(-\pi^2 a_{0.05}^2 u^2 / 12),$$

( $a_{0.05}$ 는 5% 빔경,  $u$ 의 단위는 Cycle/mm)

또, 50% 빔경을 이용할 경우<sup>[4]</sup>는

$$MTF_{spot}(u) = \exp(-\pi^2 a_{0.5}^2 u^2 / (4 \ln 2)),$$

( $a_{0.5}$ 는 50% 빔경,  $u$ 의 단위는 Cycle/mm)

로 근사된다.

Ohishi에 따르면,<sup>[5]</sup> 새도우마스크의 샘플링 효과에 따라 MTF는 다음과 같은 최대값과 최소값으로 주어진다.

$$MTF_{mask\_max}(u) = \cos\left(\frac{\theta \pi l u}{2}\right)$$

$$MTF_{mask\_min}(u) = \cos\left(\frac{\theta \pi l u}{2}\right) \cos\left(\frac{\pi}{2}(2 - |\theta|) l u\right)$$

$$\theta = 2 \left[ \frac{1}{2lu} - \text{int} \left( \frac{1}{2lu} + 0.5 \right) \right]$$

$l$  = 새도우마스크 간격

#### 2.2. CTF

시각계의 공간 특성은 공간적 콘트라스트 감도 함수(Spatial Contrast Sensitivity Function, 공간적 CSF)로 나타낼 수 있다.<sup>[6]</sup> 공간적 CSF는 그림1에 나타낸 같은 공간적인 정현파의 휘도 격자무늬 자극 패턴의 콘트라스트에 의해 측정된다.

그림 1에서 콘트라스트는

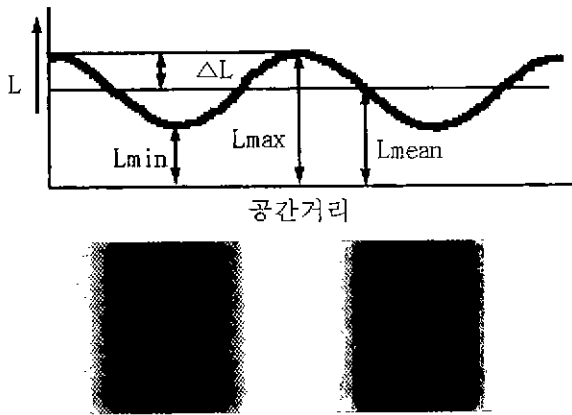


그림 1. 휘도 격자무늬

$$\frac{\Delta L}{L_{mean}} = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max} + L_{min}}$$

으로 정의된다.

이때 공간주파수(Spatial Frequency)란 1도의 시야각(Visual Angle) 안에 몇 사이클(Cycle)의 격자 무늬가 반복되는 가에 의해 결정된다. CTF(Contrast Threshold Function)는 CSF의 역수로서 주어지며, 어떤 공간주파수에서 인간의 시각계가 검출할 수 있는 최소 변조량을 말한다. CTF는 Barten식<sup>11)</sup>을 사용하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$CTF(v) = \frac{1}{ave^{-bv} \sqrt{1+ce^{-bv}}}$$

$$a = \frac{540(1+0.7/Lum)^{-0.2}}{1 + \frac{12}{w(1+v/3)^2}}, b = 0.30 \left(1 + \frac{100}{Lum}\right)^{0.15}, c = 0.06$$

w: 시야각, Lum: 디스플레이 휘도(cd/m<sup>2</sup>), v: 공간주파수(Cycle/degree)

### 2.3. MTEA<sup>7)</sup>

MTEA는 Modulation Transfer Function Area의 약어로서 디스플레이의 MTF와 눈의 CTF(Contrast Threshold Function) 사이의 면적을 말한다.

$$MTEA = \int_0^{u_{max}} \{MTF(u) - CTF(u)\} du$$

여기서, u<sub>max</sub>는

$$MTF(u_{max}) = CTF(u_{max})$$

로 정의되는 조건에서의 공간 주파수를 말한다

이 방법은 눈의 콘트라스트 검출 역치보다 작은 MTF는 화질에 기여하지 않을 것이라는 생각에 바탕을 두고 있다.

그러나, 이 방법의 문제점은 높은 공간 주파수 영역에서의 MTF값이 낮은 공간 주파수 영역의 MTF값에 비해 너무 많은 가중치를 갖는다는 점과, 이와 같은 단순한 감산은 Optical Convolution 법칙에 어긋난다는 점이다

### 2.4. SQRI

SQRI에서는 눈의 비선형성이 디스플레이의 MTF와 눈의 CTF를 제곱근하는 것에 의해 고려되었다. SQRI는 다음과 같은 물리량으로 나타내어 진다.

$$SQRI = \frac{1}{\ln 2} \int_0^{u_{max}} \sqrt{MTF(u)/CTF(u)} \frac{du}{u}$$

여기에서 u<sub>max</sub>는 디스플레이 될 수 있는 최대의 공간주파수를 의미한다.

SQRI의 계산에 있어 CTF수식에 이용되는 공간주파수 단위(v)인 Cycle/degree와 MTF의 공간주파수 단위(u)인 Cycle/mm는 다음과 관계가 있다.

$$v = \frac{\pi}{180 \arctan\left(\frac{1}{ud}\right)}$$

$$u = \frac{1}{d \tan\left(\frac{\pi}{180v}\right)}$$

단, d는 디스플레이와 사용자간 거리(mm)

## III. 실험 및 결과

### 3.1. 각 모니터별 빔경의 측정

각 모니터별 빔경의 측정은 MicroVision사의 SS210에 의해 이루어졌으며, 측정조건은 표 1과 같다.

이때, 4종류의 모니터는 각각이 발휘할 수 있는 최대의 조건 즉, 모니터의 콘트라스트 조정 단자를 최대로 설정한 상태에서, 밝기 조정 단자를 최소 또는 최대로 설정되었다. 4종

표 1. 각 모니터의 빔경 측정 조건

항 목	
실제 화면 크기	320 mm × 240 mm
Addressability	1024 × 768
평가 위치	3 곳: ※그림 2 참조
수평 주파수	68.677 kHz
수직 주파수	84.996 Hz

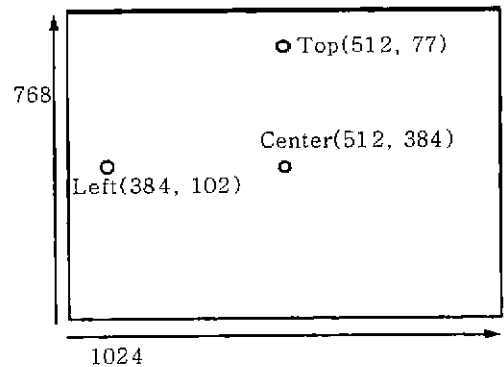


그림 2. 빔경 및 휘도 측정 위치.

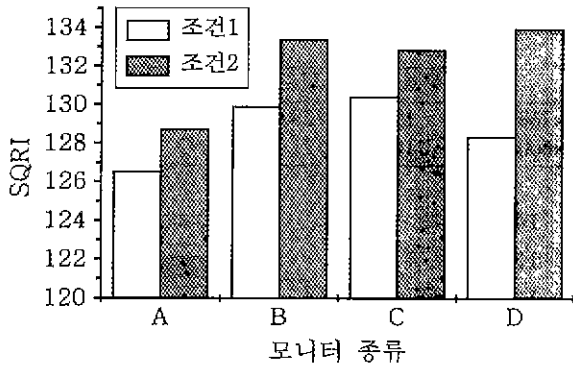


그림 3. 모니터별 SQRI

류 모니터의 방향 빔경과 새도우마스크 간격을 표 2와 표 3에 각각 나타낸다.

표 4에는 각 모니터의 조건별 휘도를 나타낸다.

단, 표 2와 표 4에 나타난 빔경 및 휘도는 각 모니터의 중앙, 윗부분 및 왼쪽의 빔경과 휘도를 각각 구한 후, 모니터의 아랫부분과 오른쪽의 효과를 고려하여 중앙에는 가중치 1을 윗부분과 왼쪽 부분에는 가중치 2를 주어 구한 평균값이다.

표 2로부터 표 4의 데이터를 바탕으로 모니터와 사용자간 거리를 500mm로 가정한 후 SQRI를 구한 결과를 그림 3에 나타낸다. 빔경은 가우시안 분포를 가정하여 50% 빔경을 이용하였고, 계산 과정에 포함되어 있는 적분은 Simpson's Rule에 따랐다.

표 2. 빔경 (단위 :  $\mu\text{m}$ )

	모니터 A	모니터 B	모니터 C	모니터 D
조건 1	0.47679	0.42432	0.38605	0.455073
조건 2	0.415	0.34476	0.32264	0.318036

표 3. 새도우마스크 간격 (단위 :  $\mu\text{m}$ )

모니터 A	모니터 B	모니터 C	모니터 D
0.236	0.210	0.244	0.256

표 4. 모니터의 각 조건별 휘도 (단위 :  $\text{cd}/\text{m}^2$ )

	모니터 A	모니터 B	모니터 C	모니터 D
조건 1	104.4	129.4	103.28	155
조건 2	90.34	120.2	93.08	128.6

단, 모니터의 휘도는 접촉식 휘도계인 미놀타사의 CA100에 의해 측정되었다.

### 3.2. 주관적 화질 평가

4개의 모니터를 표 4에 나타난 조건1과 조건2로 설정 후, 모니터의 종류는 피험자가 모르는 상태인 맹검테스트(Blind Test)로 진행되었다. 이때 각각의 모니터에는 각기 다른 휘도 및 콘트라스트, 공간 특성을 갖는 4종류의 그림(그림 4)이 1024×768의 분해능 모드, 24인치 트루칼라모드에서 모니터 전화면에 제시되고, 피험자는 이 화면을 보며 0점에서 20점까지의 점수를 부여하였다.

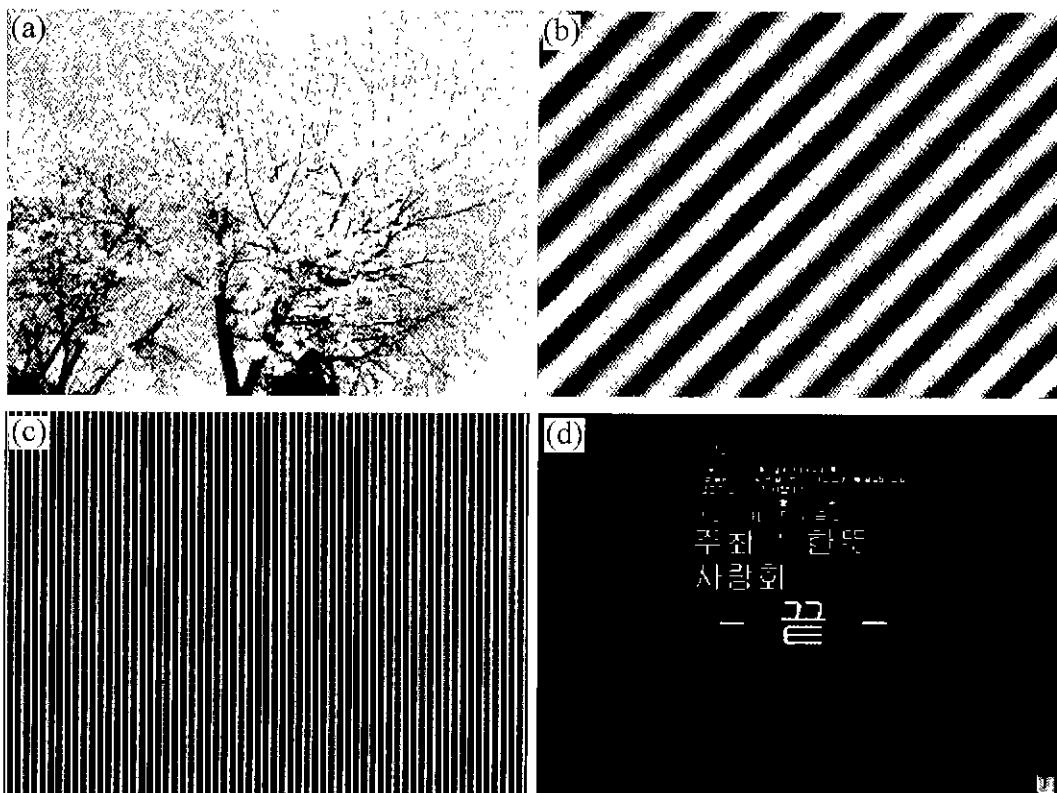


그림 4. 주관적 화질 평가에 사용된 그림들.

표 5. 모니터별 주관적 화질 평가 점수

	모니터 A	모니터 B	모니터 C	모니터 D
조건 1	0.86	1.044	0.721	1.035
조건 2	0.942	1.12	1.115	1.162

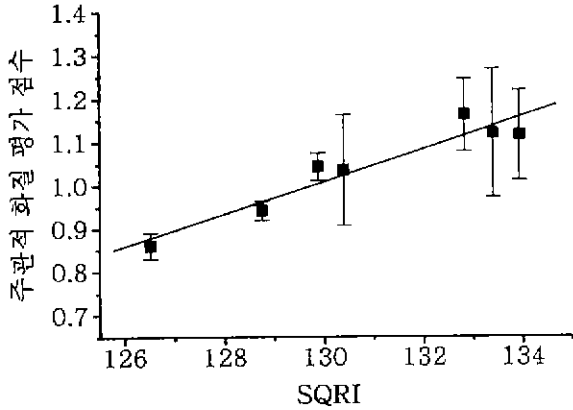


그림 5. 주관적 화질 평가 점수와 SQRI의 상관관계(단, ■는 데이터, I는 데이터의 표준편차, —는 추세선을 나타낸다).

단, 점수 부여 범위가 피험자 개개인의 성향에 따라 다르게 나타나므로 최종적인 주관적 화질 평가 점수는 피험자가 부여한 점수를 피험자 개인의 평균값으로 나누어 정규화하였다.

표 5에 각 모니터별 8명의 피험자에 의한 주관적 화질 평가 점수의 평균값은 그림 5에 주관적 화질 평가 점수와 SQRI와의 상관관계를 나타낸다. 조건2에서 모니터C의 경우, 다른 경우와 비교할 때 주관적 화질 평가 점수가 SQRI에 비해 상당히 낮게 나타나 그림 5에서는 제외시켰다. 이 이유에 대해서는 결론 부분에서 다루도록 하겠다.

### 3.3. 모니터의 다양한 물리값과 SQRI와의 관계

모니터C를 사용하여 다양한 조건별 빔경의 측정을 실시하였으며, 이때의 모니터의 기본 설정 조건은 표 6과 같다.

#### 3.3.1 분해능 모드와 SQRI의 관계

모니터의 휘도와 콘트라스트는 최대로 동일하게 한 후, 분해능 모드가 SQRI값에 미치는 영향을 검토하였다.

표 7에 실험 조건을 나타낸다.

그림 6에 분해능 모드와 SQRI의 관계를 나타낸다.

그림 6으로부터 알 수 있는 것처럼 동일한 모니터 설정 조건에서 조건5와 같이 휘도가 별로 높지 않은 상태에서는 분해능 모드 차이에 의한 빔경의 큰 차이가 없는 까닭에 SQRI값

표 6. 모니터 설정 조건

실제 화면 크기	320 mm × 240 mm
평가 위치	800 × 600 해상도 모드 : Center(400, 300), Top(400, 50), Left(50, 300) 1024 × 768 해상도 모드 : Center(512, 384), Top(512, 77), Left(102, 384)
새도우마스크 간격	0.256 mm

표 7. 모니터의 휘도 및 콘트라스트 (휘도 단위 : cd/m<sup>2</sup>)

	조건 3		조건 4		조건 5	
	휘도	콘트라스트	휘도	콘트라스트	휘도	콘트라스트
1024×768	155	19.24	128.6	1213	48.6	352
800×600	150.8	18.6	121	728.92	46.32	514.7

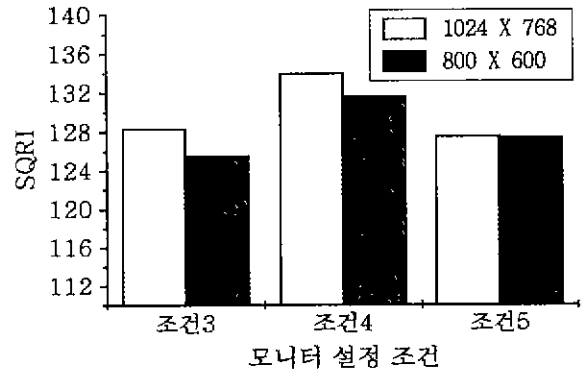


그림 6 분해능 모드와 SQRI의 관계.

도 약간의 차이 밖에 보이지 않았으나, 조건3과 4와 같은 높은 휘도의 경우에는 분해능 모드가 높은 쪽이 빔경의 감소로 인해 SQRI가 높아지는 결과가 얻어졌다.

#### 3.3.2 휘도 및 콘트라스트와 SQRI의 관계

휘도별 SQRI값을 구하기 위해서는 모니터의 콘트라스트를 일정하게 유지할 필요가 있다. 그래서, 본 실험에서는 세트 상태라는 설정의 제한성 때문에 다소 산포는 존재하지만, 최대한 동일 콘트라스트로 맞추어서 측정을 하였다. 단, 모니터의 백(R, G, B신호 크기를 255로 설정)과 흑(R, G, B신호 크기를 0으로 설정) 화면 상태의 휘도를 측정하고 이 비를 콘트라스트로 정의하였다.

표 8에 휘도별 실험에 사용한 콘트라스트 조건을 나타낸다.

그림 7에 실험 결과를 나타낸다. 그림 7로부터 알 수 있는 것처럼 휘도가 증가하면 SQRI는 증가 경향을 나타내기는 하지만, 어느 일정 레벨 이상의 휘도에서 포화되는 것을 알 수 있다. 그러나, 같은 휘도라도 콘트라스트가 높은 경우(조건8), SQRI는 높은 값을 나타내었다.

콘트라스트가 SQRI에 미치는 영향에 대해 검토하기 위해 모니터의 휘도를 일정하게 유지한 상태에서 콘트라스트를 변화시켜가며 빔경을 구하였다. 이때의 실험 조건을 표 9에, 결과를 그림 8에 나타낸다.

표 8. 휘도별 SQRI 평가 조건

	조건 6	조건 7	조건 8
휘도 (cd/m <sup>2</sup> )	51.32	47.64	85.2
	61.7	84.42	121
	86.5	103.2	
	103.2		
콘트라스트	11.33±1.475	45.91±2.73	697.3±44.77

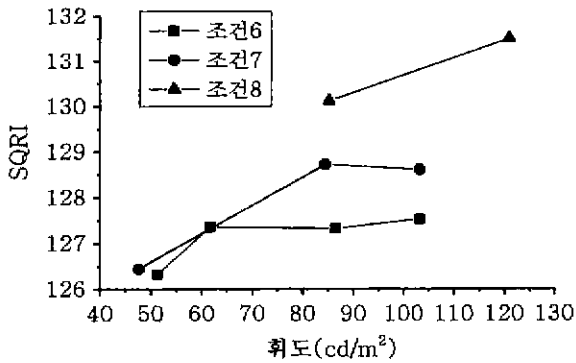


그림 7. 휘도와 SQRI의 관계

표 9. 콘트라스트별 SQRI 평가 조건

	조건 9	조건 10
콘트라스트	11.93	9.17
	46	48.5
	665.6	1000
휘도 (cd/m²)	85.37±1.05	103.33±0.115

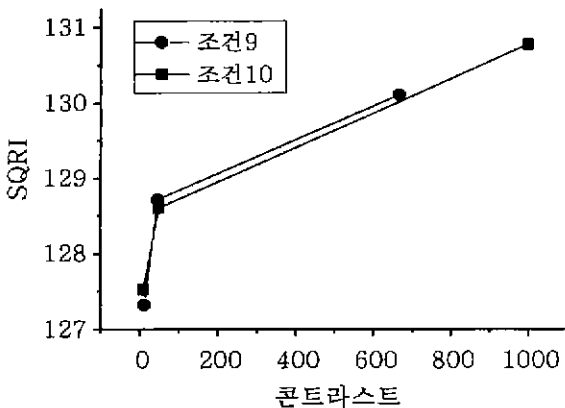


그림 8. 콘트라스트와 SQRI의 관계.

#### IV. 결 론

SQRI에 의한 주관적 화질 평가법은 4종류의 모니터에 의해 실시되어진 실제 사용자의 주관적 화질 점수와 90%이상의 높은 상관관계를 갖는 것이 증명되었다. 그러나, 모니터C의 조건2와 같이 휘도가 아주 높은 경우 빔분포는 이상적인 가우시

안 분포로부터 많이 벗어나 있으므로(데이터 제시하지 않음), 가우시안 분포를 가정하여 구한 SQRI값과 주관적 화질 평가 점수는 상관관계가 작게 되므로, 여러 가지 형태의 빔분포에 대한 보다 정확한 MTF를 구할 필요가 있는 것을 알 수 있다.

이러한 SQRI의 주관적 화질 평가 지수로서의 타당성을 바탕으로 실행되어진 모니터의 분해능 모드, 휘도, 콘트라스트 등의 물리적 특성과 SQRI의 관계에 대한 검토가 이루어졌다. 그 결과, 높은 분해능 모드의 CRT가 낮은 분해능 모드의 CRT에 비해 높은 SQRI값을 나타내어 더 나은 주관적 화질 특성을 갖는 것을 알 수 있었다.

또, 동일 콘트라스트 조건에서 휘도가 높을 수록 SQRI값은 높아지지만, 휘도가 아주 높을 경우 빔경이 커지게 되어 SQRI값은 어느 일정값 이상은 커지지 않았다. 이는 휘도가 높아져서 CSF 특성이 좋아지는 반면, 휘도가 높아짐에 따라 빔경이 커지게 되어 MTF 특성이 열화되는 것에 그 원인이 있다. 동일 휘도라 할지라도 콘트라스트가 높을 수록 큰 SQRI 값을 나타내었다.

이상과 같은 다양한 물리적 특성들과 SQRI값의 비교를 통해 CRT 디스플레이의 주관적 화질 평가 척도로서 SQRI 방법이 타당한 것을 알 수 있었다. 그러나, 색감에 대한 고려는 SQRI법에 의해 이루어질 수 없는 까닭에 색을 포함한 개념으로의 디스플레이의 주관적 화질 평가 척도의 전개가 필요한 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] Peter G. J. Barten, Image quality of CRT displays, SID, SEMINAR M-2, (1990).
- [2] Peter G. J. Barten, The Effects of Picture Size and Definition on Perceived Image Quality, Proceedings of the SID, 30(2), 67(1989).
- [3] Peter G. J. Barten, The SQRI method: A new method for the evaluation of visible resolution on a display, Proceedings of the SID, 28(3), 253 (1987).
- [4] Carlo Infante, CRT display measurements and quality, SID, SEMINAR M-3 (1995).
- [5] 大石 巖. "mosaic형 화상 장치의 공간주파수 특성", NHK 종합기연, 1970. 2.
- [6] 内川惠二. 색각 메카니즘, (朝倉書店, 동경), 116쪽, 1998
- [7] 김태희, 이윤우 외, MTF에 의한 칼라 CRT의 화질 평가, 한국광학회지, 9(3), 205 (1998).

### **Image quality evaluation of CRT Displays using SQRI method**

Kyoung Mi Cho, Jung Hee Kim, Ji Na Namgoong and Hun Soo Kim

*Corporate R&D Center, Samsung SDI Co., LTD., Suwon 442-391, Korea*

(Received December 14, 1999, Revised manuscript received March 17, 2000)

The image quality of CRT displays is described by the physical characteristics such as luminance, contrast, addressability, viewing distance, and so on. However, the final evaluation of image quality is determined by not physical data, but subjective perceived image quality. Therefore the correlation is compared the score of subjective image quality accomplished by several persons with calculated SQRI (SQuare Root Integral) value using 4 kinds of CRT monitors. And the influence of the physical characteristics for subjective image quality is analyzed on the basis of the validity of SQRI method as a metric for the evaluation of subjective image quality.