

CRT 모니터의 背景階調度가 영상의 視覺認識에 미치는 영향

金 鐘嶺***, 朴光錫**, 閔丙九**, 李忠雄***

*서울의대의 공학 연구소 **서울의대의 공학교실 ***서울대학교 전자공학과

The Effect of Background Grey Levels

on the Visual Perception of Displayed Image on CRT Monitor

Jong Hyo Kim***, Kwang Suk Park**, Byoung Goo Min**, Choong Woong Lee***.

*Institute of Biomedical Engineering, College of Medicine

**Dept. of Biomedical Engineering, College of Medicine

***Dept. of Electronics, Seoul National University.

Abstract

In this paper, the effect of background grey levels on the visual perception of target image displayed on CRT monitor has been investigated. The purpose of this study is to investigate the efficacy of CRT monitor as a display medium of image information especially in medical imaging field. Three sets of experiments have been performed in this study; the first was to measure the luminance response of CRT monitor and to find the best fitting equation, and the second was the psychophysical experiment measuring the threshold grey level difference between the target image and the background required for visual discrimination for various background grey levels, and the third was to develop a visual model that is predictable of the threshold grey level difference measured in the psychophysical experiment.

The result of psychophysical experiment shows that the visual perception performance is significantly degraded in the range of grey levels lower than 50, which is turned out due to the low luminance change of CRT monitor in this range while human eye has been adapted to relatively bright ambient illumination.

1. 序論

근래 영상 처리 관련기술의 발달에 힘입어 각종 분야에서 映像情報의 활용이 늘어남에 따라 다양한 정보들이 映像表示를 통하여 시각화되어 전달되고 있다. 그중에서 특히 의학분야에서의 의학 영상을 이용한 진단이나, 품질관리분야에서의 X-선 또는 초음파 영상을 이용한 非破壞 검사등과 같은 경우는 映像情報의 視覺의 傳達효율이 중요한 문제가 되는데, 映像獲得 과정에서는 이상이 검출되었는데도 視覺의 傳達과정에서 그 이상이 놓쳐버리는 경우가 있기 때문이다. 특히 의학분야에서 이같은 문제는 환자의 생명과 직결될수도 있기 때문에 대단히 중요한 문제로서 영상정보의 효과적인 시각적 전달을 위한 체계적인 연구가 뒷받침되어야 할 분야이다.

전자공학분야에서 영상정보의 시각적 전달에 관한 연구는 비교적 많지 않은 편이며 주로 생리학 또는 심리학분야에서 연구된 觀覺系 모델 을 그대로 적용하는 성격이 대부분이었다. 그런데 영상정보의 시각적 전달에 있어서는 많은 경우에 映像表示 媒體로 CRT 모니터가 이용되고 있으며 이는 生理學이나 心理學 분야에서의 시각 특성 실험을 위한 특수한 觀覺表示環境과 다르기 때문에 이와같은 觀覺表示環境의 차이를 觀覺系 모델에 반영해 주지 않으면 바람직한 결과를 얻을수가 없다. 따라서 영상정보의 효과적인 시각적 전달을 위한 연구가 이루어지기 위해서는 CRT 모니터를 映像表示 媒體로 이용함으로써 디지털 영상처리 분야에서 직접 이용할수 있는 시각 특성에 관한 연구가 선행되어야 한다.

본 논문에서는 디지털 영상처리분야에서 직접 이용할수 있는 시각 특성에 관한 자료를 수집하기 위하여 많은 분야에서 영상 표시기로 이용되는 CRT 모니터를 映像表示 媒體로 이용하고 이때 여러가지 背景階調度가 시각 인식 특성에 미치는 영향을 조사하며, 生理學 분야에서 제안된바 있는 觀覺系의 光化學 反應 모델을 이용함으로써 그러한 특성이 예측가능함을 나타내려고 한다.

본 논문에서 제시되는 결과는 映像情報의 視覺의 傳達에 관련된 분야, 특히 의학영상의 효과적 영상표시를 위하여 유용하게 사용될수 있을 것이며 그밖에 시각 특성을 이용한 효율적인 畫像 壓縮등의 분야에도 유용하게 적용될수 있을 것으로 기대된다.

2. 視覺認識特性和實驗

본 연구에서는 CRT모니터의 背景階調度가 視覺認識特성에 미치는 영향을 조사하기 위하여 다음과 같은 3가지의 실험을 수행하였다. 첫째로 CRT 모니터의 輝度 응답 특성의 측정, 둘째로 균일한 背景階調度 상태의 CRT 모니터에 標의 영상을 표시하였을때 그 시각적 인식에 요구되는 背景과의 臨界階調度 차이를 여러 背景階調度에 대해 측정하는 心理物理的 실험, 그리고 셋째로는 心理物理的 실험에서 얻은 결과를 예측할수 있는 觀覺系 모델을 개발하는 것이다.

1) CRT 모니터의 輝度 응답 특성

본 실험에 사용된 映像表示部는 Vectrix사(미)의 graphics board와 Monitor사(미)의 CRT 모니터로 구성되어 있으며, 1024 x 1024 해상도의 영상을 60 Hz 順次走査 방식으로 표시할수 있는 기능을 가지고 있다.

모니터의 發光 輝度 측정기로서는 National(일사)의 Digital Lux Tester (model BN-2000LT)가 사용되었는데 이 측정기는 0.1 lux 단위의 정밀도로 199.9 lux까지 측정 가능하며 단위를 10 lux로 바꿈으로써 19990 lux까지 측정이 가능하다.

측정을 위해 모든 전등을 소등하고 창에는 커튼을 쳐서 가능한 한 주변 조명의 영향을 배제하였는데 이때의 모니터 주변의 조도는 2.5 lux 정도였다. 측정을 위한 모니터의 사선 조정으로서 밝기 조정 단자를 조절하여 귀선이 보이기 직전의 상태로 바이어스 輝度を 설정하였다.

측정 방법은 모니터의 전 화면에 일정한 階調도를 표시함으로써 화면의 밝기를 균일하게 한 상태에서 측정기를 화면에 중앙에 밀착시키고 원격 조작스위치를 사용하여 화면의 輝도를 측정하였다. 이때 사용된 측정기가 照度計이므로 측정된 값은 단위 면적당 입사 광속을 나타내는 lux 이나, 측정기를 화면에 밀착시켜 측정하였으므로 측정기에의 단위면적당 입사 광속은 곧 화면에서의 단위 면적당 발산 광속과 같다고 볼수 있으며, CRT 모니터의 화면은 점 광원에 의한 完全擴散面이라고 볼수 있으므로 完全擴散面에서의 광속발산도 M과 輝度 L과의 관계를 나타내는 식 (1)을 이용하여 측정된 조도값으로부터 간접적으로 얻었다.

$$L = M / \pi \text{ -----(1)}$$

화면에 표시되는 階調度는 0 에서 250 까지 10단위로 증가시켰으며 각 階調度에 대해 10 번씩 측정하여 그 평균치를 취하였다.

2) 시각 인식 특성의 측정

이 실험에서는 CRT 모니터에 일정한 背景 階調度를 표시한 상태에서 背景 階調度보다 약간 큰 階調度를 갖는 標의 영상을 화면의 입의 위치에 발생시킨후 그 階調度의 차이를 점차로 증가시키면서 관찰자가 標의 영상을 感知하기 시작하는 데의 階調度 차이값 즉 臨界 階調度 차이를 측정하였다. 이 실험의 측정 조건을 그림 1에 보였다.

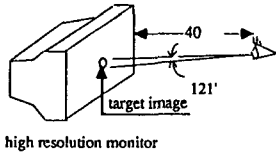


그림 1. 균일한 背景 階調度를 가진 CRT 모니터상에 표시된 標의 영상의 시각 인식 특성을 측정하는 心理物理的 실험 조건을 보여주는 그림.

관찰자는 의학 영상분야에 경험이 있는 의공학자 2명이었으며 관찰시 화면과 관찰자와는 약 40 cm 의 관찰거리를 유지하도록 하였고 標의 영상은 표시된 상태에서 지름이 14 mm 인 원형 영상이었다. 이때 標의 영상은 관찰자의 視野에서 약 121°의 視角을 차지한다. 背景 階調度는 0 에서 250까지 10 단위로 증가시켜가며 각 경우의 시각 인식 특성을 측정하였으며 각 관찰자에 대해 이 측정실험을 5번 반복 실시하여 모두 10 점의 측정값을 얻고 그 평균값을 취하여 각 背景 階調度에 대한 階調度 차이의 문턱값을 얻었다.

또한 주변조명에 의한 시각 인식 특성의 영향을 아울러 조사하기 위하여 2가지 주변 조명의 조건에 대해 이상과 같은 시각 인식 특성의 측정 실험을 실시하였으며, 그 하나는 실험 1)에서와 같이 외부조명이 가능한 차단된 상태의 조도 2.5 lux인 조명 조건이며 다른 하나는 약 3.5m 높이의 천정에 40W 형광등이 9m²당 하나씩 설치된 작업환경에서의 조명조건으로서 이때 모니터 주변의 조도는 약 170 lux 였다.

조명 조건의 변화에 따른 視覺系의 순응 과도기의 영향을 배제하기 위하여 인식 측정실험은 관찰자가 적어도 5분이상씩 조명 조건에 익숙하게 된후 시작하였다.

3) 시각 인식 특성의 예측

위와같이 측정된 시각 인식 특성의 자료는 그 자체로서도 유용하지 이용될수 있을 것이지만, 모델을 이용하여 이를 예측할수 있게 한다면 그 응용의 범위가 더욱 넓어질 것이며 시각 인식 특성을 이해하는 데도 도움이 될 것이다. 본 실험에서는 생리학분야에서 제안된 바 있는 視覺系의 光化學反應 모델에 위에서 측정된 모니터의 階度 응답 특성과 주변조명에 의한 안구의 광 산란 현상을 적용함으로써 心理物理的 실험에서 측정된바와 같은 臨界 階調度차이를 예측하는 視覺系의 모델을 개발하였다.

A. 光化學反應 모델의 반응 상수의 결정

시각 인식의 과정은 대단히 복잡하고 다단으로 연결된 일련의 과정으로 이루어져 있다. 그러나 그중에서도 가장 기본적인 과정은 망막에 있는 시각 수용기 세포에서 광 에너지가 세포의 막 전위로 변환되는 과정이다. 이 변환은 수용기 세포내의 가역적인 光化學反應에 의해 일어나는데 이 光化學反應의 완성도로서 시각 자극의 강도를 기술할수 있다. Hecht는 이 광 화학반응의 미분방정식으로부터 視覺系가 순응되어 있는 背景 階度 L과 이 視覺系가 감지할수 있는 標的의 臨界 콘트라스트 ($\Delta L/L$)와 의 관계를 식(2)과 같이 유도하였다[1]. 여기서 K_1, K_2 는 광화학계의 반응 상수들로서 자극 시간, 자극의 면적등에 따라 달라진다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)_{th} = K_1 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{K_2 L}}\right)^2 \text{ -----(2)}$$

이 모델을 시각 인식 특성에 이용할수 있게 위해서는 주어진 실험 조건에 적합한 반응 상수들을 정해야 한다. 이를 위해서 본 실험에서는 우선 視覺系의 인식 특성에 관한 문헌으로부터 본 실험과 관련된 실험자료를 구하고 기 발표 자료와 가장 잘 합치되는 반응 상수들을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 정하였다. 背景 階度가 視覺系의 인식 특성에 미치는 영향에 관해서는 많은 실험 자료가 있으며 그 대부분은 標의 광원을 대단히 짧은 시간동안 발광시킨 경우이므로 모니터에 표시된 영상인식의 경우와는 조건이 다르나 그중에서 Blackwell에 의한 실험 자료는 관찰 시간이 6초로서 길어 본 실험의 경우와 유사하다고 보고 Blackwell에 의한 실험 자료를 선정하여 본 실험 조건에서의 반응 상수들의 결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션에 사용하였다[2]. 이 문헌에는 10⁻⁶ ~ 10³ cd/m²에 이르는 넓은 범위의 背景 階度에서 다양한 크기의 標的의 인식에 요구되는 臨界 콘트라스트의 측정 자료가 실려있다. 그중에서 본 실험 조건에서의 標의 크기와 일치하는 視角 121°의 경우에 대하여 본 실험의 背景 階度 범위에 가까운 0.01 ~ 100 cd/m²의 범위내에서 그래프상의 9점에서 자료를 취하고 이 자료들과 가장 잘 일치하는 K_1, K_2 의 값을 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 결정하였다.

B. 有效 背景 階度の 결정

視覺系의 光受容 세포의 光受容 범위는 약 10³ 정도로 제한되어 있으나 背景 階度에 따라 그 동작점을 이동하는 順應作用을 함으로써 약 10¹³ 이나 되는 대단히 넓은 階度の 범위에서도 무리없이 감지작용을 한다 (3). 이 순응 작용에는 외부에서의 입사 광량을 조절하는 동공의 調節作用, 망막에 입사하는 광량에 따라 천천히 그 동작점을 이동하는 光受容細胞의 自體 順應作用, 그리고 안구의 재빠른 이동에 따라 순간적으로 순응하는 水平細胞에서의 腳方抑制등이 관련되는데 그중에서 본 실험 조건에서의 視覺系의 순응에는 공수용기의 自體 順應作用이 주로 관여하므로 여기서는 공 수용기의 自體 順應作用 만을 고려하기로 한다.

공 수용기의 自體 順應作用은 망막에 맺혀진 영상을 감지하는 각 광수용 세포에 빛이 입사함에 따라 각 공수용 세포내에서 개별적으로 일어나며, 이때 안구의 광학계에서의 빛의 산란으로 인해 각 공수용기에는 주변에서 산란되어온 빛이 함께 입사하게 되며, 따라서 각 공수용기의 감도는 주변 조명의 영향을 받게된다.

그러므로 식(2)에서의 背景 階度 L은 주변 조명이 차단된 경우에는 단순히 標의 영상의 背景 階度가 되지만, 주변 조명이 있을 경우에는 주변 조명에 의해 각 수용기에 산란되어온 광량의 영향이 고려되어야 한다. 이와같이 주변 조명의 영향이 고려된 背景 階도를 유효 背景 階도 L'라 할때 L'는 식(3)과 같이 쓸수 있으며 이때 식 (2)는 식(4)와 같이 변경되어야 한다.

$$\left(\frac{\Delta L}{L'}\right)_{th} = K_1 \left(1 + \frac{1}{\sqrt{K_2 L'}}\right)^2 \text{ -----(3)}$$

$$L' = L + L_s \text{ -----(4)}$$

식 (3)에서 L은 標의 영상의 背景 階度이며 Ls는 주변 조명으로 부터 산란되어 標의 영상을 감지하는 해당 공수용기에 입사하는 광량을 이와 같은 효과를 내는 標의 영상의 背景 階도로 나타낸 散亂光量 等價 階度로서 주변 조명과 안구의 光擴散 특성에 의해 결정된다. 이 연구에서는 안구의 光擴散 특성의 모델로서 Baxter에 의해 제시된 바 있는 [4] 식(5)와 같은 點擴散 함수(point spread function)를 사용하였다.

$$PSF(\theta) = \begin{cases} A e^{-(B\theta)^2} + \frac{C}{D + \theta^{3.3}} & |\theta| \leq 7 \\ E(F + \theta)^{-2.5} & \theta_m \geq |\theta| > 7 \end{cases} \text{ -----(5)}$$

$$A=1.13, B=2.35, C=1.42, D=9.85, E=9.35 \times 10^{-6}, F=7.8$$

여기서 θ_m 은 안구의 광학계가 수용하는 최대 광 입사각으로서 수평 방향으로는 약 100°, 수직 방향으로는 약 60°로 알려져 있으나 본 실험에서는 계산상의 편의를 위하여 그 중간값인 80°를 취하였다.

식 (5)를 이용하여 散亂光量 등가輝度 L_s 를 구하기 위해서는 주변 조명의 輝度分布를 모니터 표면의 연장 평면위에서 標의 영상의 중심으로부터의 視角의 함수로서 나타내어야 한다. 여기서는 계산의 단순화를 위해서 주변 조명의 視角에 따른 輝度分布를 그림 2와 같이 등방성을 갖는 輝度分布 $L_i(\theta)$ 로서 근사화 하였다.

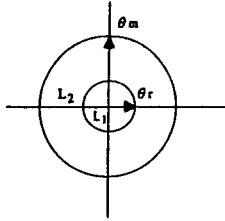


그림 2 근사화한 주변 조명의 輝度 分布. 標의 영상 중심으로부터의 視角의 함수로서 나타내었다.

그림 2에서 θ_r 는 CRT 모니터의 면적과 같은 면적을 가지는 원의 반지름에 대한 視角이며 L_1 은 주변 조명의 等價 輝度이고, L_2 는 주변 조명이 CRT 모니터의 표면에서 반사되어 생기는 반사광량에 대한 等價 輝度이다. 여기서 L_1 은 주변 조명의 측정치로부터 식 (1)을 이용하여 구하였고, L_2 는 CRT 모니터의 전원을 끈 상태에서 그 표면으로부터의 반사광량을 측정하여 얻었다. 그리고 그림 2와 같은 輝度分布 $L_i(\theta)$ 를 식 (5)와 같은 점 확산함수 PSF(θ)에 의해 가중 적분한 후 광 수용기의 면적 [5]로 나누어 줌으로써 散亂光量 等價輝度 L_s 를 구하였다. 이와같이 구한 散亂光量 等價輝度 L_s 와 앞서 얻은 K_1 및 K_2 , 그리고 CRT 모니터의 輝度 응답특성에 의한 L 을 식(3)과 식(4)에 대입함으로써 모니터의 背景階調度에 따라 標의 영상이 인식되기 위한 臨界 階調度 차이의 예측값을 구하였다.

3. 實驗結果

CRT 모니터의 輝度 응답특성의 측정결과를 그림 3에 보였다. 그림 3에서 흰 원으로 표시된 것이 측정값이다. 이 측정결과로부터 CRT 모니터의 輝度 응답특성을 나타내는 관계식을 식 (6)과 같이 구하였다. 여기서 G 는 階調度이고 L 은 輝度이며 B 는 階調度 0 일때의 바이어스 輝度이고 k 는 계수이다.

$$L = kG^{2.2} + B \text{ -----(6)}$$

그림 3에서 실선으로 나타난 곡선이 식(6)로부터의 계산값인데 측정치와 잘 일치하고 있음을 볼 수 있다.

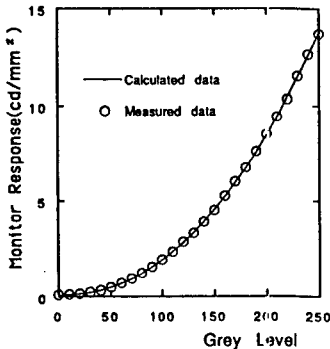


그림 3 고해상도 모니터의 輝度 응답 특성. 흰 원은 측정값을, 그리고 실선은 식(6)으로부터의 계산값을 나타낸다.

여러가지 背景階調度에서 標의 영상의 시각 인식특성을 측정하는 心理物理的 실험 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림에서 검은 원은 螢광등을 소등한 상태의 측정결과를 나타내며 흰 원은 螢광등을 점등한 경우의 측정결과를 나타낸다.

보이는 바와 같이 標의 영상이 인식되기 위한 臨界 階調度의 차이는 背景階調度에 따라 큰 차이가 있으며, 특히 낮은 背景階調度에 대해서는 큰 階調度 차이가 필요한 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 주변 조명이 밝을 경우 더욱 두드러져서 낮은 背景階調度 상에 표시된 標의 영상은 주변 조명이 밝으면 그 시각적 인식률이 대단히 저하됨을 알 수 있다.

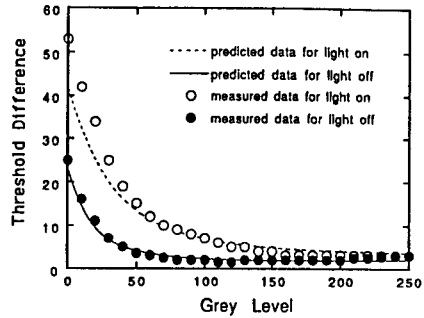


그림 4 여러가지 背景階調度에 대한 標의 영상의 시각 인식 측정 실험 및 觀覺系 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 실험 결과. 검은 원 및 흰 원은 각각 螢광등 소등 및 점등 상태의 측정결과이고 실선 및 점선은 나타난 곡선은 각각 螢광등 소등 및 점등 상태에 대한 시각모델의 예측결과이다.

觀覺系의 光化學反應 모델의 반응상수 K_1, K_2 를 결정하기 위한 실험의 결과를 그림 5에 보였다. 여기서 흰 원은 문헌 [2]의 자료중에서 標의 영상의 크기 視角 12'에 해당하는 그래프에서 취한 값들이고 실선은 컴퓨터 시뮬레이션으로 얻은 K_1, K_2 를 적용하여 구한 계산결과를 나타낸다. 본 실험에서 사용된 標의 영상의 크기 視角 12'에 대하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과 Blackwell의 자료와 가장 잘 일치하는 반응상수 K_1, K_2 는 각각 0.0064, 42.7 이었다.

주변 조명에 의한 散亂光量 等價輝度 L_s 는 주변 조명에 의한 輝度 分布를 그림 2와 같이 근사화 하고 식 (5)를 이용하여 구한 결과 螢광등을 소등한 상태 및 螢광등을 점등한 상태에 대하여 각각 0.9와 62.5 cd/m²였다.

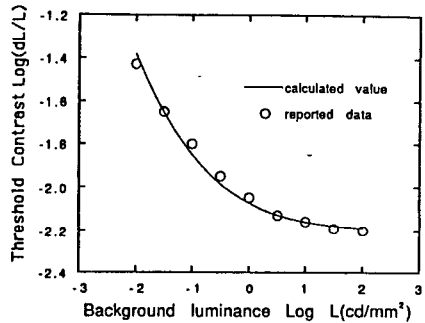


그림 5 觀覺系의 光化學反應 모델의 반응상수 K_1, K_2 를 결정하기 위한 실험의 결과. 흰 원은 문헌 [2]로부터 취한 자료들이고 실선은 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 얻은 K_1, K_2 를 적용하여 얻은 계산결과를 나타낸다. 여기서 標의 영상의 크기는 12'이다.

이와같이 구한 散亂光量 等價輝度 L_s 와 앞에서 구한 K_1, K_2 그리고 식 (6)과 같은 모니터의 輝度 응답특성을 식(3), (4)와 같은 觀覺系 모델에 적용함으로써 각 背景階調度에서 標의 영상의 인식에 필요한 臨界 階調度 차이의 예측값을 구할 수 있었는데 이와같이 구한 예측결과를 그림 4의 心理物理的 실험 결과에 중복하여 실선과 점선으로 나타내었다. 여기서 실선은 螢광등 소등상태에 대한 예측치이고 점선은 螢광등 점등상태에 대한 예측치이다.

4. 檢討

두 가지 조명 조건에 대하여 視覺系 모델의 예측치는 心理物理的 실험의 측정치와 대체로 잘 일치하였다. 螢光등 점등시 아주 낮은 階調度에서 보이는 오차는 모니터 표면에서의 반사광이 주변환경에서의 반사광을 반영하므로 실제로는 불균일한데 모델에서는 이를 균일하다고 근사화하였기 때문인 것으로 생각된다.

그림 4와 같이 낮은 階調度의 범위에서 標의 영상의 인식에 필요한 臨界 階調度 차이가 커지는 것은 그림 3에 나타난 바와 같이 CRT 모니터가 이 범위에서 작은 輝度 변화율을 가짐으로써 CRT 모니터 상에 표시된 영상정보의 시각적 전달 효율이 떨어지기 때문임을 알 수 있다.

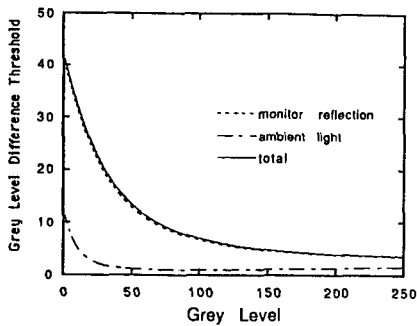


그림 6. 주변조명이 標의 영상의 인식에 미치는 영향에 대한 컴퓨터 시뮬레이션 실험 결과.

標의 영상의 인식에 영향을 미치는 주변 조명의 요소는 그림 2에서와 같이 두 가지로 나눌수 있는데 그 하나는 모니터 표면에서의 반사광이고 다른 하나는 그의 주변으로부터의 빛이다. 이 두 가지 요소 각각이 標의 영상의 인식에 미치는 영향을 알아보기 위하여 그림 2와 같이 근사화된 주변 조명 분포에서 모니터에서의 반사광 L_2 또는 그의 주변 조명 L_1 중 하나만 존재할 경우를 가정하였을때 標의 영상의 인식에 필요한 臨界 階調度 차이를 앞에서 사용된 視覺系의 모델을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 구하였다. 그림 6에 그 결과를 나타내었는데 이 결과로부터 標의 영상의 인식을 방해하는 주변 요소는 모니터 표면에서의 반사광인 것을 알 수 있다.

5. 結論

CRT 모니터의 背景階調度가 標의 영상의 인식에 미치는 영향을 조사하기 위하여 세가지 실험을 수행하였다. 그 첫번째 실험인 CRT 모니터의 輝度 응답 특성 측정 실험 결과 CRT 모니터는 階調度에 대하여 지수 2.2 인 冪乘의 관계가 있는 것이 밝혀졌으며, 두번째 실험인 標의 영상의 인식에 대한 心理物理的 실험에서는 CRT 모니터의 背景階調度가 50 이하로 낮은 영역에 대해서는 標의 영상의 인식을 위한 배경과의 階調度 차이가 상당히 커짐을 알 수 있었다. 세번째 실험인 視覺系 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션 실험에서는 Hecht의 光化學 반응 모델에서의 背景輝度에 주변 조명에 의한 안구에서의 散亂光量 等價輝度を 반영함으로써 心理物理的 실험결과와 잘 일치하는 예측치를 얻을 수 있었다.

이 모델을 이용한 분석 결과 낮은 背景階調度에서 視覺效率이 저하되는 것은 視覺系가 주변 조명에 순응되어 있는데 반하여 모니터의 변화율은 이 범위에서 매우 작은 때문임을 알 수 있었다. 특히 주변 조명이 밝을때 낮은 階調度의 범위에서 視覺效率이 급격히 떨어지는 것은 모니터의 표면에서 반사되는 반사광이 주 원인이라는 사실 또한 이 모델을 이용한 분석을 이용하여 알 수 있었다.

*. 참고문헌

- [1] Hecht, S., "A theory of visual intensity discrimination", *J. Gen. Physiol.*, Vol. 18, pp. 767-789, 1935.
- [2] H.R. Blackwell, "Contrast Thresholds of the Human Eye", *J. Opt. Soc. Am.*, Vol. 36, pp 624-643, 1946.
- [3] Moses, *Adler's Physiology of the Eye*, Mosby, London, pp. 389-390, 1975.
- [4] Brent Baxter, H. Ravindra, R.A. Normann, "Changes in lesion detectability caused by light adaptation in retinal photoreceptors", *Invest. Radiol.*, Vol. 17, pp. 394-401, 1982.
- [5] Martin D. Levine, *Vision in Man and Machine*, McGraw Hill, New York, p. 75, 1985.