

## 화상센서의 잡음 특성 측정

### Measurement of noise characteristics of an image sensor

이태경\*, 한재원†

Tae-Kyoung Lee and Jae Won Hahn

#### Abstract

We setup the system to measure the noise characteristics of the 5M complementary metal-oxide semiconductor (CMOS) image sensor by generic measurement indicator of Standard mobile imaging architecture (SMIA) which is one of internal standard of mobile imaging architecture. To evaluate the effect of environment and setting parameters, such as temperature and integration time, we measure the variation of the dark signal, dynamic range and fixed pattern noise of image sensor. We also detect the number of defective pixels and cluster defects defined as adjacent single defect pixels at 5M CMOS image sensor. Then, we find the existence of some cluster defects in experiment, which are not expected in calculation.

**Key Words :** image sensor, noise characteristic, dynamic range, defective pixel, cluster defect

#### 1. 서 론

휴대폰용 화상센서의 화질 개선을 위한 개발 방향은 크게 두 갈래로 나뉜다. 첫째는 화소의 크기를 줄여 집적도를 높이는 것으로, 이는 일정한 크기의 화상센서에 더 많은 화소를 집적시켜 높아진 해상도(resolution)를 이용하여 화질을 향상시키는 방향이다. 둘째는 화소의 크기가 일정한 상태에서 잡음을 줄임으로써 신호대잡음비, 동적 영역 등을 높여 화질을 향상시키는 방향이다. 지금까지는 화소의 크기를 줄여 집적도를 높이는 방향으로 CMOS형 화상센서 개발 연구가 활발하게 진행되었다. 하지만 최근 광자 산탄 잡음(photon shot noise), 회절(diffraction)과 같은 빛의 속성들로 인하여 잡음, 해상도, 선예도(sharpness), 색재현(color reproduction) 등 화질을 결정하는 요소들의 성능개선이 한계에 도달하였고, 회절한계로 인하여 렌즈의 성능이 화상센서의 성능을 받쳐주지 못하게 되어 화상센서의 화소 크기를

줄여 집적도를 높이는 의미가 약해지고 있다[1]. 따라서 CMOS형 화상센서의 화질 개선을 위해 잡음을 줄이는 방향의 개발 연구가 필요하게 되었고, 이러한 필요에 따라 화상센서의 잡음 특성 측정의 중요성도 높아지고 있다. 잡음 특성 측정에 관련하여 Hassan et al.[2], Andrew et al.[3]는 각각 CMOS APS(Active pixel sensor) 화상센서와 CMOS photogate 화상센서의 잡음 특성을 측정하였고, Heli T. Hytti[4]는 raw data를 이용하여 잡음 특성을 분석할 수 있음을 보였다. 그리고 Dudas et al.[5]과 Kristin et al.[6]은 불량화소의 측정과 보정에 관하여, Ho et al.[7]은 LCD에서 불량화소의 시인성에 관한 논문을 발표하는 등, 다양한 항목의 잡음 특성 측정에 관련된 연구들이 진행되어 왔다. 또한 화상센서의 잡음 특성은 센서의 평가와 선택을 위한 중요한 지표일 뿐만 아니라 image processing chain(digital gain, denoising, interpolation, color processing, and compression) 개발을 위한 중요한 정보이기 때문에 측정이 필요하다[8].

본 연구에서는 화상센서의 잡음 특성 측정을 위해 화상센서의 온도와 입사되는 광량이 조절 가능한 장치를 구성하였으며, 화상 센서의 작동 환경과 조건에 따른 변화를 확인하기 위해 온도에

† 연세대학교 기계공학과

E-mail : jaewhahn@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-5811

\* 연세대학교 기계공학과

다른 암신호와 동적영역을 측정하고, 적분시간에 따른 암신호와 고정패턴잡음을 측정하여 그 경향을 살펴보았다. 그리고 휴대폰용 화상센서의 국제 기준인 SMIA에서 정의한 기준[9]을 이용하여 화상센서 특성 측정결과를 분석하였으며, 불량화소 및 cluster defect를 측정하였고 확률적 계산 수치와 비교하였다.

## 2. 잡음 이론

화상센서의 잡음이란 원하지 않는 신호의 증폭 또는 신호의 감소를 의미하며 시간에 따라 변하는 일시적 잡음(temporal noise)과 공간에 따라 변하는 공간 잡음(spatial noise)이 있다. 일시적 잡음은 광자 산탄 잡음, 암전류 산탄 잡음, 리셋 노이즈(reset noise), 출력 증폭기 잡음(output amplifier noise) 등이 있으며 frame averaging을 통해 그 영향을 줄일 수 있다. 공간 잡음은 고정패턴잡음, 광반응 불균일성(photo-response non-uniformity), 암전류 불균일성(dark current non-uniformity) 등이 있으며, 이것은 frame subtraction 또는 gain/offset correction techniques을 통해 그 영향을 줄일 수 있다[10,11]. 그 중 화상센서의 주요 특성들은 아래와 같다.

### 2.1 암전류 (Dark signal)

암전류는 체적 암전류(bulk dark current)와 표면 암전류(surface dark current)로 구분되며 표면 암전류는 센서 표면의 실리콘-이산화 실리콘 경계(silicon-silicon dioxide interface)의 결정구조의 결함에 의해, 그리고 체적 암전류는 원료 물질(starting material)의 질과 공정과정의 결함에 의해 발생한다. 또한 금속 불순물, 광자에 의한 클러스터 결함(proton induced cluster damage) 등에 의해 주변 화소들에 비해 매우 높은 암전류를 나타내는 국소 암전류 스파이크(localized dark current spike)가 발생한다[10-13]. 체적 암전류,  $I_{dark}$ 를 나타내는 이론적인 공식은 식 (1)이며, 수광부의 구조와 결정 상태에 따른 상수  $B$ 를 이용해 간단히 식 (2)와 같이 표현하기도 한다[10,11,13].

$$I_{dark} = 2.5 \times 10^{15} \times A \times I_d \times T^{1.5} \times \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (1)$$

$$I_{dark} = B \times \exp\left[-\frac{E_g}{2kT}\right] \quad (2)$$

여기서  $A$ 는 pixel area( $\text{cm}^2$ )이고  $I_d$ 는 300 K에서의 암전류(A),  $T$ 는 절대온도(K),  $k$ 는 볼츠만 상수(eV/K),  $B$ 는 수광부의 구조와 결정 상태에 따른 상수이다.  $E_g$ 는 실리콘의 energy bandgap(eV)으로 식 (3)과 같이 구해진다[14].

$$E_g = 1.1557 - \frac{7.021 \times 10^{-4} \times T^2}{1108 + T} \quad (3)$$

암전류의 증가는 블랙 레벨(black level)의 증가를 의미하여 이에 따라 동적영역이 작아져 화상센서의 성능 저하를 가져온다. 또한 암전류의 불균일성으로 인하여 고정패턴잡음과 암전류 산탄잡음이 발생하여 추가적인 화질 저하를 유발한다. 그리고 국소 암전류 스파이크에 의해 불량화소 발생의 원인이 된다.

### 2.2 고정패턴잡음 (Fixed pattern noise, FPN)

고정패턴잡음은 출력신호의 불균일성을 나타내며, 전체 화소에 동일한 세기의 빛이 입사될 때 나오는 각 화소의 출력신호의 표준편차로 계산된다[3]. 고정패턴잡음은 화소증폭기와 ADC(analog to digital converter)의 불균일성 및 암전류의 불균일성 등에 의해 발생한다. 고정패턴잡음은 화상센서의 회로 구조에 따라 수직 고정패턴잡음(vertical fixed pattern noise), 수평 고정패턴잡음(horizontal fixed pattern noise)으로 구분되기도 한다.

### 2.3 동적 영역 (Dynamic range)

동적 영역은 바닥잡음(noise floor)에 대한 픽셀의 포화레벨(saturation level)의 비율로 식 (4)와 같이 나타낸다[10,15].

$$\text{Dynamic range} = 20 \times \log \frac{\text{Saturated signal}}{\text{Noise floor}} \quad (4)$$

동적 영역은 image상에 표현할 수 있는 최대 신호와 최소 신호의 비를 나타내며, 신호대잡음비와 함께 화상센서의 성능을 나타내는 주요한 지표이다. 여기서 바닥잡음이란 read noise라고도 불리며 광자 산탄잡음을 제외한 잔류잡음(residual noise)을 나타낸다. 이러한 바닥잡음은 영상의 어두운 부분의 화질을 제한하는

요소이며, 적분시간이 길어질수록 커지는 경향이 있다[15].

**2.4 신호대잡음비 (Signal to noise ratio)**

신호대잡음비는 출력신호와 잡음의 비율이며 식 (5)와 같이 나타낸다[10,15].

$$SNR_{over} = 20 \times \log \frac{Signal}{\sqrt{\sigma_{shot}^2 + \sigma_{floor}^2}} \quad (5)$$

여기서 *Signal*은 출력 신호값을  $\sigma_{shot}$ 은 광자 산탄잡음을,  $\sigma_{floor}$ 는 바닥잡음을 나타낸다. 신호대잡음비가 높을수록 전체 신호에서 잡음이 차지하는 비율이 작아 실물에 가까운 이미지를 구현할 수 있다.

**2.5 불량화소 (Defective pixel)**

불량화소는 일정한 환경 안에서 주변 화소에 비해 매우 크거나 작은 신호를 나타내는 화소를 말한다. 불량화소는 화상센서에 입사하는 빛이 없는 환경(dark field)에서는 hot pixel이, 일정한 세기의 빛이 화상센서의 모든 화소에 균일하게 입사하는 환경(bright field)에서는 stuck pixel과 dead pixel이 나타나는 특징을 가진다. 이러한 불량화소가 한정된 영역 내에 다수 존재하는 경우 cluster defect라 하며, 하나의 행 또는 열 내에 다수의 불량화소가 존재할 경우 line defect라고 한다[16-18].

Cluster defect는 3 × 3 화소의 중심 화소가 불량화소이고 근접한 8개의 화소 중 1개 이상의 화소들이 불량화소인 경우를 나타낸다. 일반적으로 사용되는 불량화소의 보정 방법은 단일 불량화소를 기준으로 하여 만들어졌으며, 그림 1과 같이 근접한 화소들의 출력신호의 평균을 이용하여 보정한다. 그러나 불량화소들이 군집형태로 존재하는 cluster defect의 경우, 근접한 화소들의 출력신호의 평균을 이용한 보정으로는 정확한 보정이 이루어지지 않기 때문에 화질 저하의 원인이 된다.

**2.6 SMIA (Standard mobile imaging architecture)**

SMIA는 2004년 7월 Nokia사와 STMicro-electronics사가 발표한 포괄적인 휴대폰용 카메라 모듈 규격으로 영상정보를 휴대폰 본체로

연결하는 고속 인터페이스 및 기계 디자인 등을 상세히 규정하고 있다[19]. SMIA가 정의하는 내용은 카메라에서부터 데이터 출력까지의 raw bayer output image sensor head를 그 범위로 하며 또한 휴대폰용 카메라 특성 측정 환경과 측정 방법에 관해서도 규정하고 있다.

SMIA에서 정의하고 있는 카메라 특성 항목들은 앞서 설명한 암신호, 신호대잡음비, 동적 영역을 비롯하여 다양한 항목들이 있다. 측정 항목들은 측정방식에 따라 bright field 측정항목과 dark field 측정항목으로 나눌 수 있다. Bright field 측정항목은 출력신호와 잡음의 비율을 나타내는 신호대잡음비, 화상센서의 반응성을 나타내는 감도를 비롯하여 화상센서가 포함되는 조도인 최대 조도(maximum illumination), 화상센서가 잡음과 구별되는 최소 신호를 출력하는 조도인 최소 조도(minimum illumination)가 포함된다. 또한, 화상센서 출력의 비선형성을 나타내는 differential non-linearity와 integral non-linearity, 각 화소의 반응성의 불균일성을 나타내는 광반응 불균일성, 화상센서의 중심과 주변부의 입사되는 광량 차이를 나타내는 상대 조도(relative illumination)도 bright field 측정항목이다. 반면, dark field 측정에서는 화상센서가 표현할 수 있는 최대조도와 최소조도의 비를 나타내는 동적 영역, 빛이 없는 상태에서 발생하는 신호인 암신호가 주된 측정항목이며, 각 화소, 열과 행에서 발생하는 신호들의 불균일성을 나타내는 암신호 불균일성, 수직 고정패턴잡음, 수평 고정패턴잡음이 포함된다. 그 외에 각 화소의 시간에 따른 출력 신호의 요동을 나타내는 일시적 잡음, 열과 행의 시간에 따른 출력 신호의 요동을 나타내는 column noise와 row noise, 화상센서의 frame stability를 나타내는 frame to frame flicker가 있다.

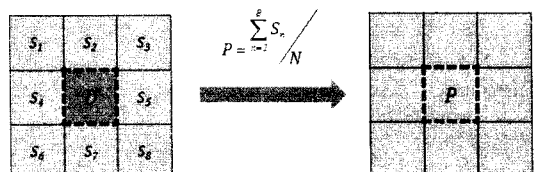


Fig. 1 불량 화소 보정 기법 ( $D$  : 불량화소,  $S_n$  :  $n$  화소의 출력신호,  $N$  : 보정에 사용된 화소의 개수,  $P$  : 보정된 신호)

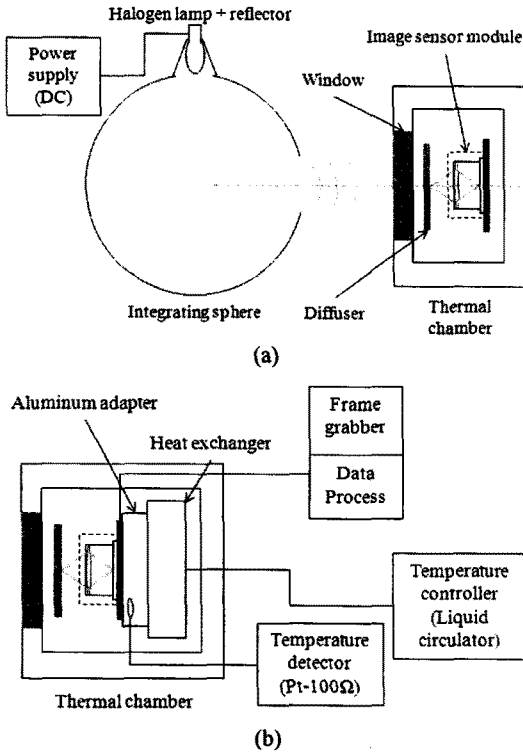


Fig. 2 화상 센서 특성 측정 장치 (a) 광원 및 광경로 (b) 항온챔버

### 3. 실험 장치 및 측정 절차

#### 3.1 실험 장치

화상센서의 특성 평가를 위해 그림 2와 같이 장치를 구성하였다.

화상센서에 균일한 빛이 입사하는 bright field를 구현하기 위해 색온도 3100K의 할로겐 램프와 적분구(Edmund optics: NT58-585), 확산판(Edmund optics: NT46-106)을 사용하였다. 광량은 조도계(Minolta: T-10M)를 이용하여 측정하였다. 여기서 작은 광원으로 화상센서 모듈의 최대 광각을 사용할 수 있도록 광원과 화상센서 사이에 확산판을 설치하였으며, 화상센서에 입사되는 빛의 광균일성을 향상시키기 위해 적분구를 이용하여 확산판에 입사되는 빛의 광균일도를 높여주었다.

화상센서에 빛이 입사하지 않는 dark field 구현과 화상센서의 온도 조절을 위해 항온챔버를 제작하였다. 항온챔버는 알루미늄박스, 단열재(실리콘 스폰지), 아크릴박스의 구조를 가지며, 열교환기(에이스텍: WJ-

50)와 항온순환수조(제이오텍: RW-0525G)를 이용하여 0.1℃의 안정도(stability)로 -10℃에서 70℃까지 온도 변화가 가능하도록 구성하였다. 또한 화상센서의 온도는 백금촉온저항체(Pt-100Ω)와 포터블 레코더(Yokogawa: MV1004)를 이용하여 측정하였다. 여기서 항온챔버는 단일 역할과 함께 전면에 설치된 창을 제외한 부분으로의 빛의 침입을 막아주며, 전면에 설치된 창의 개폐를 통해 bright field와 dark field 환경을 조절한다.

구성된 장치의 재연성을 확인하기 위해 55℃ 환경에서 암신호를 반복 측정하여 0.38%의 오차가 발생함을 확인하였고, 이를 통해 장치의 재연성에 문제가 없음을 확인하였다.

#### 3.2 측정 절차 & 샘플

측정 화상센서로는 삼성전기의 5M 화상센서 모듈을 사용하였고 이는 Micron 5M(MT9P012) 화상센서와 에프 수(f-number) 2.8, 초점거리 4.527 mm의 렌즈로 구성되어 있다.

잡음 특성을 측정하기 위해 먼저 측정할 화상센서를 항온챔버 내부에 설치하고 할로겐 램프의 광량을 조절 한 후 항온챔버 내부 온도를 조절하였다. 할로겐 램프를 항온챔버 온도보다 먼저 조절하는 이유는 입사되는 빛에 의해 발생하는 열까지 포함하여 화상센서의 온도를 조절하기 위함이다. 그리고 적분시간, 아날로그 이득(gain), 디지털 이득을 조절한 후 출력신호를 획득하였다.

### 4. 측정 결과

#### 4.1 온도에 따른 암신호와 동적 영역 측정

온도 변화에 따른 암신호의 크기를 기술한 식 (1)에서 볼 수 있듯이, 화상센서의 잡음은 일반적으로 온도가 높아지면 증가한다. 또한 온도가 높아지면 바닥잡음이 증가하기 때문에 동적 영역이 낮아지게 된다. 그림 3은 온도에 따른 5M 화상센서의 암신호와 동적 영역의 변화이다. 실험조건으로는 적분시간은 0.2초, 아날로그 이득 5, 디지털 이득 1을 사용하였다. 식 (1)에서 나타나듯이 암신호는 온도에 따라 지수함수적으로 증가함을 확인 할 수 있으며, 동적 영역은 감소하는 것을 확인 할 수 있다. 여기서 DN(digital signal)은 10 bit digital signal을 의미한다.

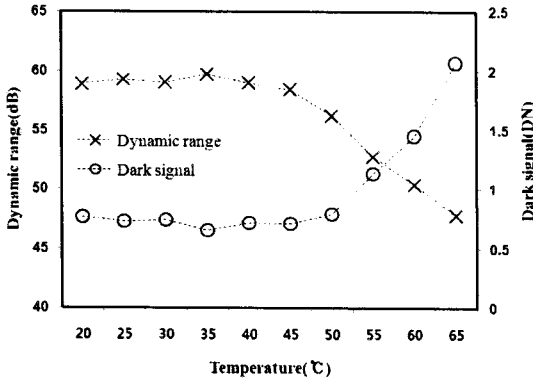


Fig. 3 온도에 따른 암신호와 동적영역의 변화

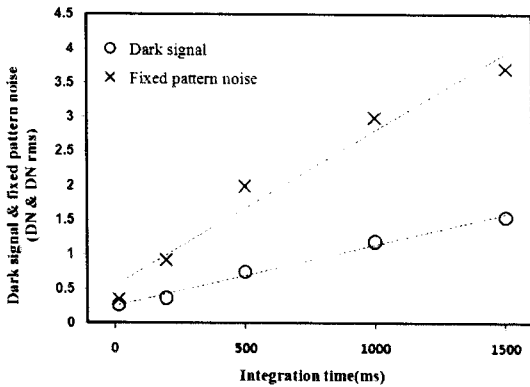


Fig. 4 적분 시간에 따른 암신호와 고정패턴잡음의 변화

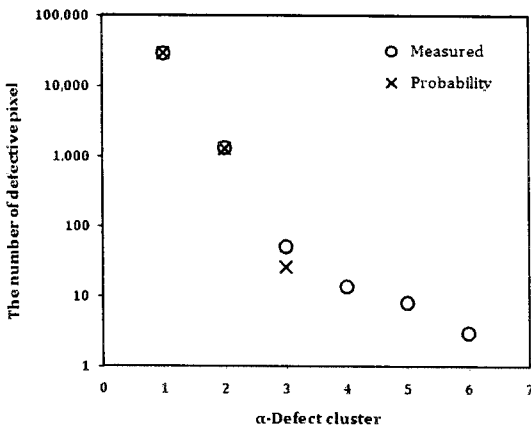


Fig. 5 측정된 불량 화소의 개수와 확률적으로 계산된 불량 화소의 개수

4.2 적분시간에 따른 암신호와 고정패턴잡음 측정

그림 4는 적분시간에 따른 암신호와 고정패턴잡음의 변화이다. 실험조건으로는 온도 55°C, 아날로그

이득 1.75, 디지털 이득 1을 사용하였다. 암신호와 고정패턴잡음은 적분시간에 따라 선형으로 증가하고 있음을 확인 할 수 있었으며, 암신호의 증가율은  $8.92 \times 10^{-4}$  DN/s이고 고정패턴잡음의 증가율은  $2.27 \times 10^{-3}$  DN/s이다.

4.3 불량화소 (Defective pixel)

불량화소의 기준은 dark field에서 평균 출력신호의 1.5배 이상의 신호가 나오는 화소로 정의하였고, cluster defect는 3×3 화소에  $\alpha$ 개( $\alpha=1\sim9$  사이의 정수)의 불량화소가 존재할 경우  $\alpha$ -defect cluster로 세분화 하였다. 그림 5는 5M 화상센서의 불량화소를 측정된 결과와 확률적으로 계산된 cluster defect의 개수를 비교하여 보여주고 있다. Cluster defect의 확률적 계산은 측정된 single defect가 전체 화상센서에 고르게 분포해 있을 것이라 가정하고 경우의 수를 이용하여 2-defect cluster부터 9-defect cluster까지의 개수를 계산하였다.  $\alpha$ -defect cluster를 구하는 공식은 식 (6)과 같다. (1-defect cluster는 single defect와 동일)

$$\alpha\text{-defect cluster} = {}_8 C_{(\alpha-1)} \times \frac{(M-9)}{M!} \times \frac{N!}{(N-\alpha)!} \times \frac{(M-N)}{(M-N-7+\alpha)!} \quad (6)$$

여기서  $M$ 은 전체 화소의 개수를,  $N$ 은 signal defective pixel의 개수를 나타낸다.

그림 5는 측정된 불량화소의 개수와 확률적으로 계산된 불량 화소의 개수이다. 식 (6)을 이용해 확률적으로 cluster defect를 계산하면 4-defect cluster 이상의 cluster defect는 존재하지 않지만, 측정 결과에서는 4, 5, 6-defect cluster가 존재함을 확인할 수 있다.

4.4 SMIA 기준 측정 결과

5M 화상센서를 휴대폰용 화상센서 국제 기준인 SMIA에서 정의한 기준을 이용하여 특성을 분석하였다. 측정 조건으로 온도는 23°C와 70°C를 사용하였으며, 조도는 1000lx를 사용하였다. 그리고 최대 적분시간은 0.125초, 최소 적분시간은 0.001초, 아날로그 이득은 1.75, 디지털 이득은 1을 사용하였다. 측정 결과는 표 1과 같다.

측정결과 70°C 온도 조건에서 최소 조도는 2.36 배 증가하였고 동적 영역은 4.64dB 감소하였으며,

Table 1 5M 센서의 특성 측정 결과

Characteristics	Value (23℃)	Value (70℃)	Unit
Bright field test			
Signal to noise ratio	$3.52 \times 10^1$	$3.54 \times 10^1$	dB
Sensitivity	$1.72 \times 10^{-2}$	$1.79 \times 10^{-2}$	1/lx·sec
Maximum illumination	$5.83 \times 10^4$	$5.59 \times 10^4$	lx
Minimum illumination	$2.93 \times 10^2$	$4.02 \times 10^2$	lx
Differential non-linearity	$2.93 \times 10^{-2}$	$3.57 \times 10^{-2}$	Code/FSD
Integral non-linearity	$1.18 \times 10^{-3}$	$1.07 \times 10^{-3}$	Code/FSD
Photo-response non-uniformity	$8.41 \times 10^{-1}$	$8.37 \times 10^{-1}$	%
Relative illumination	$3.78 \times 10^1$	$3.75 \times 10^1$	%
Dark field test			
Dynamic range	$5.67 \times 10^1$	$5.20 \times 10^1$	dB
Dark signal	$1.17 \times 10^{-3}$	$-4.99 \times 10^{-3}$	Code/FSD·sec
Dark signal non-uniformity	$2.70 \times 10^{-3}$	$3.32 \times 10^{-2}$	Code/FSD·sec
Column fixed pattern noise	$1.42 \times 10^{-4}$	$1.23 \times 10^{-4}$	Code/FSD
Row fixed pattern noise	$1.47 \times 10^{-4}$	$9.06 \times 10^{-5}$	Code/FSD
Temporal Noise	$-5.72 \times 10^1$	$-5.78 \times 10^1$	dB
Column Noise	$-8.03 \times 10^1$	$-8.01 \times 10^1$	dB
Row Noise	$-7.58 \times 10^1$	$-7.77 \times 10^1$	dB
Frame to frame flicker	$3.97 \times 10^{-4}$	$3.64 \times 10^{-4}$	Codes

암신호 불균일성은 123배 증가하였다. 이러한 결과를 통해 70℃에서 잡음 및 바닥잡음의 증가를 확인할 수 있다.

### 5. 결론

본 논문에서는 화상센서 잡음 특성 측정 장치를 구성하였으며, 구성된 장치를 이용하여 Micron 5M 화상센서의 잡음 특성을 측정하였다. 잡음 특성 측정은 온도에 따른 암신호와 동적 영역의 변화를 관찰하였으며, 온도가 증가함에 따라 암신호는 지수함수적으로 증가하고 동적 영역은 감소하는 것을 확인하였다. 또한 적분시간에 따른 암신호와 고정패턴잡음의 변화를 관찰하였으며, 암신호와 고정패턴잡음이 적분시간에 따라 선형으로 증가하고 증가율이 각각  $8.92 \times 10^{-4}$  DN/s와  $2.27 \times 10^{-3}$  DN/s임을 확인하였다. 그리고 불량화소를 측정하고, 측정된 cluster defect의 개수와 확률적으로 계산한 cluster defect의 개수를 비교하여 확률적으로는 존재하지 않는 4, 5, 6-defect cluster가 존재함을 확인하였다.

또한 휴대폰용 카메라의 화상센서에 대한 국제 기준인 SMIA에서 정의한 기준을 이용하여 5M 화상센서의 특성을 측정하였으며 그 결과를 표로 정리하였다. 이러한 연구결과를 이용하여 화상센서 모듈의 특성을 이해하고 센서의 평가와 선택 및 image processing chain 개발을 위한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

### 참고문헌

- [1] ISA, 2007, "CPIQ Initiative Phase 1 White Paper - Fundamentals and review of considered test methods", pp.5.
- [2] H. Belhrach, M. Karim, J. Farre, 2001, "Noise characterisation in CMOS APS imagers for highly integrated imaging systems" The 13<sup>th</sup> international conference on microelectronics, pp.31-34.
- [3] A. J. Blanksby, M. J. Loinaz, 2000, "Performance Analysis of a Color CMOS Photogate Image Sensor", IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 47, No. 1, pp.55-64.
- [4] H. T. Hytti, 2005, "Characterization of digital image noise properties based on RAW data", SPIE-IS&T Electronic Imaging, Vol. 6059, 60590A.
- [5] J. Dudas, C. Jung, G. Chapman, I. Koren, and Z. Koren, 2006, "Robust detection of defects in imaging arrays", Proc. SPIE, Vol. 6059, 60590X.
- [6] K. Ackerson, C. Musante, J. Gambino, J. Ellis-Monaghan, D. Maynard et al., 2008, "Characterization of "blinking pixels" in CMOS Image Sensors", ASMC, pp.255-258.
- [7] H. H. Ho, J. M. Foley, S. K. Mitra, 2006, "Visibility and annoyance of LCD defective sub-pixels of different colors for different surrounds and positions", Proc. SPIE, Vol. 6059, 60590W.
- [8] A. Foi, S. Alenius, V. Katkovnik, K. Egiazarian, 2007, "Noise Measurement for Raw-Data of Digital Imaging Sensors by Automatic Segmentation of Nonuniform Targets", IEEE sensor journal, vol. 7, no. 10, pp.1456-1461.
- [9] SMIA, 2004, "SMIA 1.0 Part 5 : Camera Characterisation Specification Rev A".
- [10] Kodak, 2006 "CCD image sensor noise source".
- [11] E. J. Meisenzahl, W. C. Chang, W. DesJardin, S. L. Kosman, J. Shepherd, E. G. Stevens, K. Y. Wong, 1999, "A Six Million Pixel Full-Frame True 2ø CCD Image Sensor Incorporating Transparent Gate Technology and Optional Antiblooming Protection", SPIE Annual Meeting, pp.1-9.
- [12] 박상식, 2007, "CCD/CMOS 화상센서", 전자신문인터넷, 1판, pp.143-144.
- [13] J. R. Janesick, 2001, "Scientific Charge-Coupled Devices", SPIE PRESS, pp. 505-525.
- [14] J. Pankovem, 1971, "Optical Processes in Semiconductors", Dover Publications, pp. 27.

- [15] Hewlett-Packard, 1998, "Noise Source in CMOS Image Sensors".
- [16] [http://en.wikipedia.org/wiki/Defective\\_pixel](http://en.wikipedia.org/wiki/Defective_pixel).
- [17] Micron, 2007, "1/4-Inch 2-Megapixel CMOS Digital Image Sensor Product Brief".
- [18] Kodak, 2006, "KODAK KAI-4021 IMAGE SENSOR".
- [19] 이윤우, 2006, "SMIA(Standard Mobile Imaging Architecture)용 저전압 광대역 PLL 설계", 연세대학교.