Journal of The Institute of Electronics and Information Engineers Vol.53, NO.8, August 2016 http://dx.doi.org/10.5573/ieie.2016.53.8.113
ISSN 2287-5026(Print) / ISSN 2288-159X(Online)

논문 2016-53-8-13

# 온도 손실의 최소화를 위해 Sub-Frame 제어 기법을 적용한 적외선 영상 투사기용 신호입력회로

## ( A Read-In Integrated Circuit for IR Scene Projectors Adopting a Sub-Frame Control Technique for Minimizing the Temperature Loss )

신 의 섭*, 조 민 지*, 강 우 진**, 조 영 민*, 이 희 철***

( Uisub Shin, Min Ji Cho, Woo Jin Kang, Young Min Jo, and Hee Chul Lee© )

요 약

본 논문에서는 30 Hz의 프레임률로 동작하는 적외선 영상 투사기 (IR scene projector, IRSP)에서 투사되는 적외선 영상의 유효온도 감소를 최소화하기 위해 sub-frame 제어 기법을 적용한 IRSP용 신호입력회로 (read-in integrated circuit, RIIC)를 제안한다. 제안하는 sub-frame 제어 기법은 단위 프레임을 8개의 sub-frame으로 나누어 동일한 영상 데이터를 8회 refresh함으로써 픽셀 내 커패시터에 sampling된 영상 데이터가 유지 기간 동안 MOSFET 스위치를 통한 누설 전류로 인해 손실되는 정도를 감소시킨다. Emitter에서 투사되는 적외선 영상의 높은 유효온도를 위해 전류 구동형 RIIC를 설계하였으며, 외부의 DAC로부터 아날로그 전압 형태의 영상 데이터를 전송 받는다. 시제품 64×32 RIIC array 칩은 매그나칩/SK하이닉스 0.35 $\mu$m 2-poly 4-metal CMOS 공정으로 제작되었으며, 출력 가능한 최대 데이터 전류는 230.3 $\mu$A이다. 이를 15 kΩ의 저항 값을 갖는 시제품 emitter 소자에 인가할 시 mid-wavelength IR (MWIR) 대역을 기준으로 최대 366.2 ℃의 유효온도를 갖는 적외선 영상의 투사가 가능하다.

Abstract

In this paper, a read-in integrated circuit (RIIC) for IR scene projectors (IRSPs) adopting a sub-frame control technique is proposed, which minimizes the reduction of the apparent temperature of the IR images projected from IRSPs operating at a frame rate of 30 Hz. The proposed sub-frame control technique significantly reduces the amount of scene data loss on capacitors, which is caused by leakage currents flowing through MOSFET switches during holding periods, by dividing a unit frame into 8 sub-frames and refreshing the same scene data for each sub-frame. A current-drive RIIC was designed for the higher apparent temperature of IR radiated from the emitter, and it receives the scene data as a form of analog voltages from an external DAC. A prototype chip with a 64×32 RIIC array was fabricated using Magnachip /SKhynix 0.35 $\mu$m 2-poly 4-metal CMOS process, and the measured maximum output data current is 230.3 $\mu$A. This amount of current ensures the projection of IR images whose maximum apparent temperature is 366.2 ℃ in the mid-wavelength IR (MWIR) when applied to a prototype emitter having a resistance of 15 kΩ.

**Keywords** : IRSP, RIIC, sub-frame control, 적외선 영상 투사기, 신호입력회로

* 학생회원, *** 정회원, 한국과학기술원 전기 및 전자공학부
(Department of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology)
** 정회원, SK하이닉스 (SK hynix)
© Corresponding Author (E-mail : hclee@kaist.ac.kr)
※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 한국과학기술원 초고속비행체특화센터에서 수행되었습니다.
※ 본 연구는 반도체설계교육센터 (IDEC)의 MPW 칩 제작 지원으로 수행되었습니다.
Received ; March 15, 2016 Revised ; July 8, 2016 Accepted ; July 28, 2016

## Ⅰ. 서 론

적외선 영상 시스템은 열 적외선을 방출하는 모든 물체를 감지하기 위한 필수적인 장치로서 군수 분야를 중심으로 의료, 보안 등의 다양한 분야에서 그 중요도가 매우 크다. 이러한 적외선 영상 시스템의 정확한 성능 검증을 위해서는 실제와 유사한 시험 환경이 요구되지만 비용 및 안전성 측면에서 여러 가지 한계가 있다[1]. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 디지털 영상 데이터를 적외선 영상으로 변환하여 투사함으로써 적외선 영상 시스템의 성능을 검증할 수 있는 적외선 영상 투사기(IR scene projector, IRSP)에 대한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 특히, 고속 동작 및 고온의 영상 표현에 유리한 thermal type의 resistive emitter를 이용하는 방식이 주로 채택되고 있다[2].

신호입력회로 (read-in integrated circuit, RIIC)는 디지털 영상 데이터를 아날로그 신호로 변환하여 emitter array에 인가함으로써 emitter 소자에 joule heating을 발생시켜 그에 따른 열 적외선을 방출시키기 위한 장치이다. 일반적인 적외선 센서는 30 Hz에서 100 Hz의 프레임률로 동작한다. 하지만 IRSP가 이러한 수준의 프레임률로 동작할 경우 RIIC 내 커패시터에서 긴 데이터 유지 시간동안 발생하는 데이터 손실로 인해 원하는 적외선 영상의 온도를 표현하는 것에 어려움이 따른다.

본 논문에서는 30 Hz의 프레임률로 동작하는 IRSP에서 발생하는 적외선 영상의 유효온도 감소 문제를 해결하기 위해 sub-frame 제어 기법을 적용한 IRSP용 RIIC를 제안하고, 64×32 RIIC array의 제작 및 검증을 수행하였다.

## Ⅱ. RIIC 동작 및 sub-frame 제어

### 1. RIIC 단위 픽셀 회로 및 기존 동작의 문제점

Emitter 소자를 구동하는 RIIC는 크게 전압 구동형과 전류 구동형으로 구분된다. 전압 구동형의 경우 emitter의 온도가 입력 데이터 전압의 제곱에 비례하는 반면, 전류 구동형의 경우 입력 데이터 전압의 네제곱에 비례하는 특성을 보인다. 즉, 전압 구동형의 경우 고해상도의 온도 표현에 적합한 반면, 전류 구동형의 경우 투사되는 적외선 영상의 높은 유효온도 확보에 유리하다[3]. 그림 1은 snapshot 방식의 적외선 영상 투사가 가능한 일반적인 전류 구동형 RIIC의 단위 픽셀 회로도를 보이고 있다. Snapshot 방식은 emitter array의 모든 픽셀들

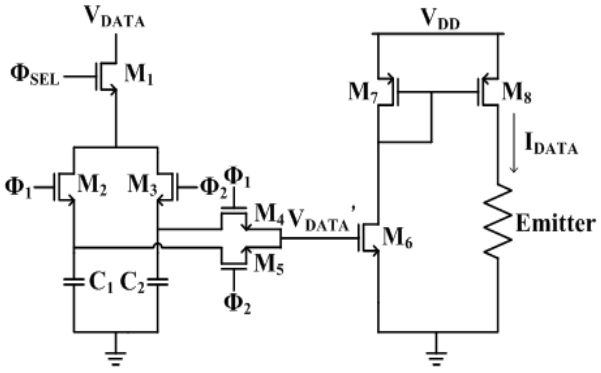


그림 1. 전류 구동형 RIIC 단위 픽셀 회로도
Fig. 1. A circuit schematic of current-drive RIIC unit pixel.

에 영상 데이터가 동시에 업데이트 되어 고속 동작 시에도 안정적인 적외선 영상의 출력이 가능한 투사 방식이다. 그림 1의 RIIC 단위 픽셀 회로의 기본 동작은 다음과 같다. 먼저 첫 번째 프레임이 시작되면 array를 구동하는 control logic에 의해 $\Phi_{SEL}$이 HIGH가 되어 스위치 $M_1$이 켜지고, 동시에 $\Phi_1$이 HIGH가 되어 스위치 $M_2$가 켜지면서 영상 데이터 전압 $V_{DATA}$가 커패시터 $C_1$에 저장된다. 동일한 원리로 array 내 모든 픽셀들의 $C_1$에 영상 데이터 전압의 저장이 완료되면 한 프레임이 종료된다. 다음 프레임이 시작되면, $\Phi_2$가 HIGH가 되어 스위치 $M_3$가 켜지고, 각 픽셀의 스위치 $M_1$이 순차적으로 켜지면서 커패시터 $C_2$에 $V_{DATA}$가 저장된다. 한편, $\Phi_2$가 HIGH가 되면 스위치 $M_5$도 켜지게 된다. 따라서 각 픽셀의 $C_2$에 데이터가 저장되는 동안, 이전 프레임에서 $C_1$에 저장되었던 $V_{DATA}$가 current mirror를 구동하는 트랜지스터 $M_6$의 게이트 전압이 되어 데이터 전류 $I_{DATA}$를 발생시키고, 이 전류가 emitter 소자에 인가되어 joule heating을 발생시키는 방식으로 동작한다. 위의 과정이 번갈아 반복되면서 emitter array에서는 매 프레임마다 적외선 영상의 투사가 가능해진다. Emitter 소자에 인가되는 $I_{DATA}$는 수식 (1)로 정의되며, 그로 인해 발생하는 joule heating과 emitter 소자의 물리적 온도와의 관계식은 수식 (2)와 같다.

$$I_{DATA} = \frac{1}{2}\mu C_{OX}\frac{W}{L}(V_{DATA}' - V_{TH})^2 \quad (1)$$

$$I_{DATA}^2 R = G(T_{Physical} - T_{Substrate}) \quad (2)$$

수식 (2)에서 R과 G는 각각 emitter 소자의 저항 값과 열전도도를 나타낸다. 한편, 이상적인 경우 수식 (1)의 $V_{DATA}$'은 입력 데이터 전압 $V_{DATA}$와 동일한 값이다.

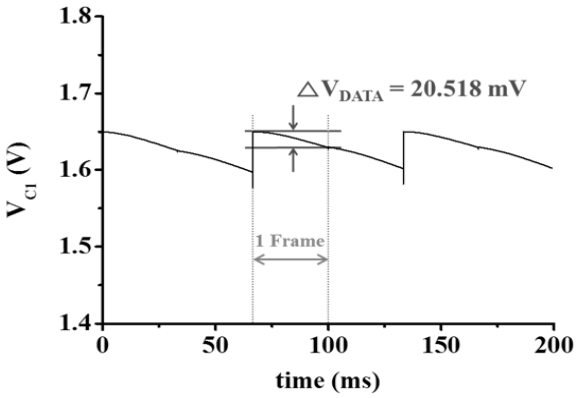


그림 2. 누설전류로 인한 커패시터 $C_1$의 방전
Fig. 2. Discharge of capacitor $C_1$ due to leakage current.

하지만 단위 프레임 시간 동안 한 픽셀의 커패시터 $C_1$ 또는 $C_2$에 저장된 $V_{DATA}$는 나머지 픽셀들이 address되는 동안 일정한 값으로 유지되지 못하고 스위치를 통한 누설 전류로 인해 감소하게 된다. 그림 2는 30 Hz의 프레임률로 동작 시, 단위 프레임 시간 동안 $C_1$에서 20.518 mV의 $V_{DATA}$ 감소가 발생하는 것을 나타내고 있다. 후속 프레임이 시작됨과 동시에 스위치 $M_4$ 또는 $M_5$가 켜지면서 이전 프레임에서 감소된 데이터 전압이 current mirror를 구동하기 때문에 결과적으로 $V_{DATA}$'는 $V_{DATA}$보다 작은 값을 가지게 된다. 이는 emitter 소자에 인가되는 $I_{DATA}$를 감소시켜 결국 emitter로부터 투사되는 적외선 영상의 온도 감소 문제를 야기한다.

## 2. 제안하는 sub-frame 제어 기법

기존의 30 Hz의 프레임률로 동작하는 RIIC에서 발생하는 데이터 전압 감소로 인한 적외선 영상의 온도 감소 문제를 완화하기 위해 sub-frame 제어 기법을 제안하였다. 제안하는 제어 기법은 한 프레임을 여러 개의

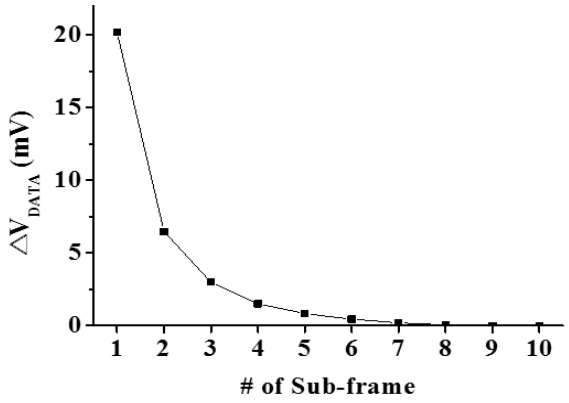


그림 3. Sub-frame의 개수에 따른 $V_{DATA}$ 손실량
Fig. 3. The amount of $V_{DATA}$ loss vs. the number of sub-frames.

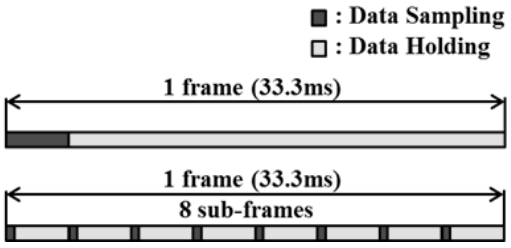


그림 4. 기존 동작과 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 단위 프레임 시간 분배
Fig. 4. Time distributions of a unit frame of the conventional and sub-frame-controlled operations.

sub-frame으로 나누어 영상 데이터의 refresh를 통해 커패시터에 저장된 데이터 전압의 손실을 감소시키는 기법이다. 그림 3은 sub-frame의 개수에 따른 $V_{DATA}$ 손실량의 시뮬레이션 결과를 보이고 있다. $V_{DATA}$ 손실량은 sub-frame의 개수에 반비례하는 특성을 보이며 한 프레임을 8개 이상의 sub-frame으로 나누어 제어할 경우 손실량은 0.1 mV 이하로서 온도 감소가 관찰될 정도의 emitter 전류 변화를 발생시키지 않는다. 그림 4는 기존 30 Hz 동작과 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 단위 프레임 시간 분배를 나타내고 있다. 기존 동작의 경우 약 33.3 ms의 단위 프레임 시간 동안 한 번의 데이터 sampling이 이뤄지므로 긴 시간동안 데이터를 유지해야 하지만 sub-frame 제어의 경우 한 프레임을 8개의 sub-frame으로 나누어 영상 데이터를 refresh함으로써 실질적인 데이터 유지 시간을 감소시킬 수 있다. 각 RIIC 픽셀에 8회에 걸쳐 동일한 영상 데이터 전압이 인가되므로 emitter array에서 투사되는 적외선 영상의 프레임률은 30 Hz로 기존 동작과 동일하다. 하지만 반복적인 refresh를 통해 각 픽셀의 커패시터의 데이터 유지 시간을 줄임으로써 $V_{DATA}$의 감소가 최소화되므로 후속 프레임에서 온도 손실이 최소화된 적외선 영상의 표현이 가능해진다.

그림 5는 기존 동작과 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 입력 데이터 전압 $V_{DATA}$에 따른 출력 데이터 전류 $I_{DATA}$의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 트랜지스터 $M_6$의 threshold 전압 이상의 모든 입력 전압에 대해서 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 경우가 더 높은 $I_{DATA}$를 출력하며 최대 13.356 $\mu$A의 차이를 보인다. 그림 5의 시뮬레이션 결과를 수식 (2)에 적용하여 예상되는 emitter 소자의 물리적 온도를 그림 6에 나타내었다. 수식 (2)의 R과 G에는 표 1에 나타낸 시제품 emitter 소자의 저항 값과 열전도도를 대입하였다. 그 결과 sub-frame 제어 기법을 적용할 경우 기존 동작에

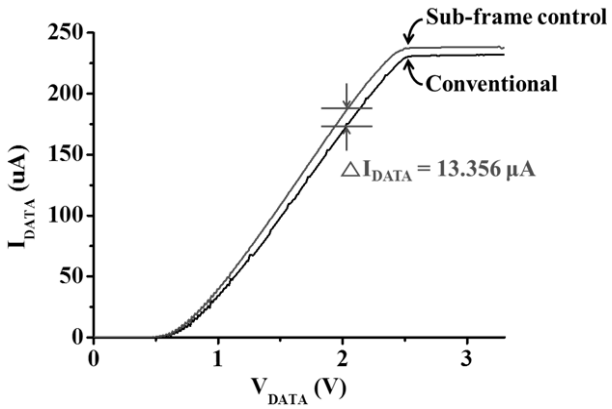


그림 5. 기존 동작과 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 입력 데이터 전압에 따른 출력 데이터 전류
Fig. 5. Output data current vs. input data voltage for the conventional and sub-frame-controlled operations.

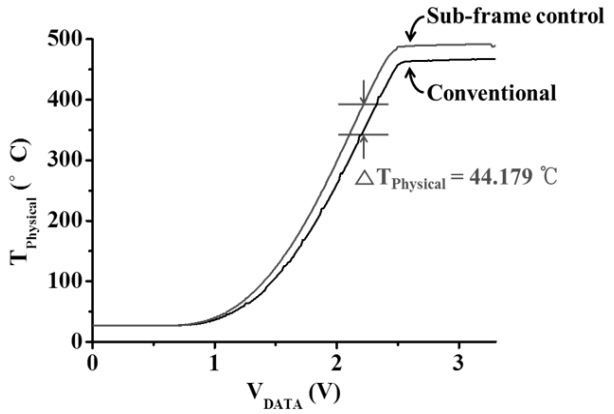


그림 6. 기존 동작과 sub-frame 제어 기법이 적용된 동작의 입력 데이터 전압에 따른 emitter 소자의 물리적 온도
Fig. 6. Physical temperature of the emitter vs. input data voltage for the conventional and sub-frame-controlled operations.

비해 최대 44.179 ℃ 더 높은 emitter 소자의 물리적 온도를 얻게 됨을 예상할 수 있다.

표 1. 시제품 emitter 소자의 사양
Table1. Specifications of the prototype emitter device.

| | |
|---|---|
| Resistance | 15 kΩ |
| Thermal conductance | 1.834 μW/K |
| Fill factor | 72 % |
| Emissivity | 0.8 |

## Ⅲ. RIIC array 칩 제작 및 검증

제안하는 sub-frame 제어 기법을 적용한 64×32 RIIC array를 매그나칩/SK하이닉스 0.35 μm 2-poly 4-metal CMOS 공정을 통해 제작하였다. 그림 7은 제작된 칩의 모습을 나타내고 있으며 그림 8은 제작된 칩의 검증을 위해 구축한 측정 시스템의 블록도를 나타내고 있다. 디지털 영상 데이터를 아날로그 신호로 변환하여 RIIC로 입력하기 위해 8-bit DAC를 사용하였으며, 그에 따라 출력되는 영상 데이터 전류를 관찰하기 위해 칩 저항 array 및 14-bit ADC를 사용하였다. 칩 저항 array는 시제품 emitter 소자의 저항 값과 동일한 15 kΩ의 저항으로 구성하였다. 저항에 인가되는 전압을 측정한 후 저항 값을 이용해 전류를 계산하는 방식으로 제작된 칩의 전류 구동 능력을 검증하였다. 그림 9는 제작된 칩의 입력 데이터 전압에 따른 출력 데이터 전류의 시뮬레이션과 측정 결과를 비교하고 있다. 두 결과를 비교해보면 전류의 출력이 시작되는 지점의 입력 데이터 전압의 크기 (트랜지스터의 threshold 전압)에 약 0.25 V의 차이가 존재한다. 이러한 차이로 인해 측정 시 모든 입력 데이터 전압에 대해서 시뮬레이션에 비해 낮은 데이터 전류가 출력되었으며, 이 때 측정된 최대 출력 전류는 230.3 μA이다. 측정된 최대 출력 전류 값을 수식 (2)에 대입하

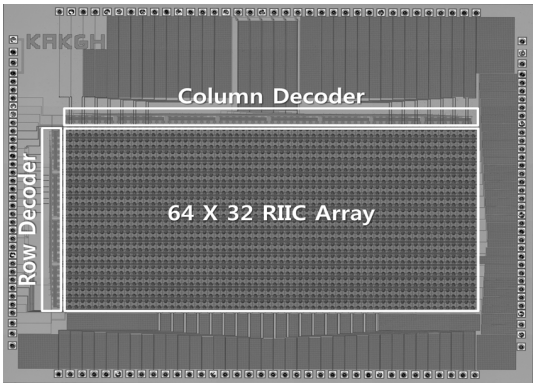


그림 7. 제작된 64×32 RIIC array 칩
Fig. 7. Fabricated chip with a 64×32 RIIC array.

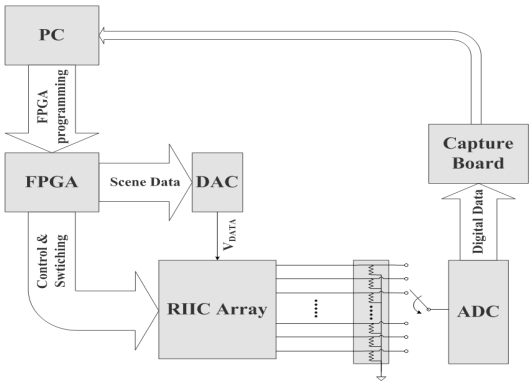


그림 8. 64×32 RIIC array 칩 측정 시스템의 블록도
Fig. 8. Block diagram of the measurement system for the fabricated chip.

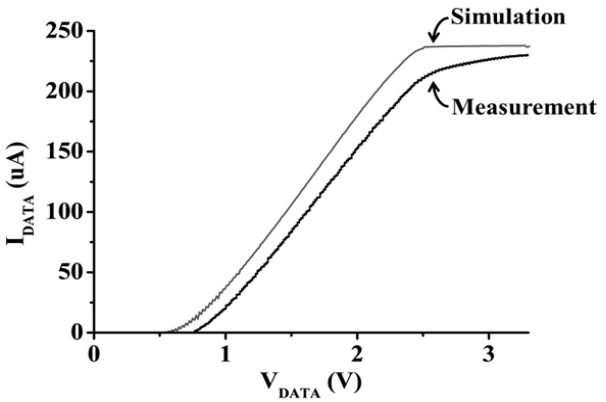


그림 9. 제작된 칩의 입력 데이터 전압에 따른 출력 데이터 전류의 시뮬레이션과 측정 결과 비교

Fig. 9. Comparison of the simulation and measurement results of output data current vs. input data voltage of the fabricated chip.

여 계산한 시제품 emitter 소자의 최대 물리적 온도는 460.7 ℃이다. 이 값을 수식 (3)에 적용하면 최종적으로 시제품 emitter 소자에서 방출되는 적외선 영상의 최대 유효온도 계산이 가능하다.

$$T_{Apparent}^{4} = \alpha T_{Physical}^{4} \tag{3}$$

수식 (3)의 $\alpha$는 fill factor, emissivity와 같은 emitter 소자의 물리적 특성에 의해 결정되는 상수이며 수식을 통해 계산된 mid-wavelength IR (MWIR) 대역 적외선 영상의 최대 유효온도는 366.2 ℃이다. 따라서, 제작된 RIIC array와 시제품 emitter 소자를 결합하여 구동할 경우 MWIR 대역을 기준으로 상온 27 ℃부터 366.2 ℃ 사이의 유효온도를 갖는 적외선 영상의 투사가 가능할 것임을 예상할 수 있다. 그림 10은 제작된 RIIC array에

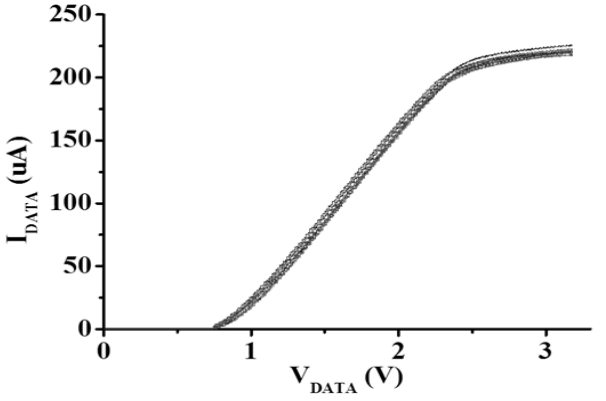


그림 10. 제작된 RIIC array에 분포하는 여러 픽셀들의 출력 데이터 전류 측정 결과

Fig. 10. Measured output data currents of the multiple pixels distributed across the fabricated RIIC array.

분포하는 10개의 픽셀들에서 출력되는 데이터 전류의 측정 결과를 보이고 있다. 최대 데이터 전류를 기준으로 수식 (4)를 통해 계산되는 불균일도는 약 3.6 %이다. 공간 균일도가 높은 적외선 영상의 투사를 위해서는 RIIC array와 함께 emitter array의 불균일성도 고려되어야 하며 일반적으로 전체 IRSP 시스템이 구축된 후 look-up table 생성을 통한 불균일성 보정 (non-uniformity correction)이 이뤄진다[4].

$$Nonuniformity(\%) = (1 - \frac{I_{DATA(\min)}}{I_{DATA(\max)}}) \times 100 \tag{4}$$

## REFERENCES

[1] P. Bryant, S. Solomon, and J. James, “Bolometers running backwards: the synergy between uncooled IR sensors and dynamic IR scene projectors,” Proc. SPIE, Vol. 6207, 62070J pp. 1-12, May 2006.

[2] O. Williams, G. Goldsmith, and R. Stockbridge, “History of resistor array infrared projectors: hindsight is always 100% operability,” Proc. SPIE, Vol. 5785, pp. 208-224, Jun 2005.

[3] S. Mchugh, et al., “MIRAGE dynamic IR scene projector overview and status,” Proc. SPIE, Vol. 3697, pp. 209-222, Jul 1999.

[4] J, Robert, L. Swierkowski, and O. Williams, “Emissive infrared projector sparse grid nonuniformity correction,” Defense and Security. International Society for Optics and Photonics, pp. 91-102, May 2005.

## 저 자 소 개

**신 의 섭**(학생회원)

2015년 충남대학교 전자공학과 학사 졸업.

2015년～현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사과정 재학.

<주관심분야: Infrared scene projector circuit design>

**강 우 진**(정회원)

2011년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.

2013년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업.

2015년～현재 SK하이닉스 선임연구원.

<주관심분야: Infrared scene projector, Radiation hardened device and circuit design>

**이 희 철**(정회원)

1978년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.

1986년 동경공업대학교 전자공학과 석사 졸업.

1989년 동경공업대학교 전자공학과 박사 졸업.

2004년～2010년 나노종합기술원 소장 역임.

1989년～현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 교수.

<주관심분야: Infrared scene projector, Infrared detector, Radiation hardened device and circuit design>

**조 민 지**(학생회원)

2015년 이화여자대학교 전자공학과 학사 졸업.

2015년～현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사과정 재학.

<주관심분야: Infrared scene projector circuit design>

**조 영 민**(학생회원)

2009년 경북대학교 전자공학과 학사 졸업.

2011년 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 석사 졸업.

2011년～현재 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 박사과정 재학.

<주관심분야: Infrared scene projector, Infrared detector circuit design>