

# CTIA 바이어스 상쇄회로를 갖는 초점면 배열에서 마이크로 볼로미터의 온도변화 해석

논 문
60-12-22

## Analyses of temperature change of a $\mu$ -bolometer in Focal Plane Array with CTIA bias cancellation circuit

박 승 만\*  
(Seung-Man Park)

**Abstract** - In this paper, we study the temperature change of a  $\mu$ -bolometer focal plane array with a capacitive transimpedance amplifier bias cancellation circuit. Thermal analysis is essential to understand the performance of a  $\mu$ -bolometer focal plane array, and to improve the temperature stability of a focal plane array characteristics. In this study, the thermal analyses of a  $\mu$ -bolometer and its two reference detectors are carried out as a function of time. The analyses are done with the  $30\mu\text{m}$  pitch  $320\times 240$  focal plane array operating of 60 Hz frame rate and having a columnwise readout. From the results, the temperature increase of a  $\mu$ -bolometer in FPA by an incident IR is estimated as  $0.689\text{ }^\circ\text{C}$ , while the temperature increase by a pulsed bias as  $7.1\text{ }^\circ\text{C}$ , which is about 10 times larger than by IR. The temperature increase of a reference detector by a train of bias pulses may be increased much higher than that of an active  $\mu$ -bolometer. The suppression of temperature increase in a reference bolometer can be done by increasing the thermal conductivity of the reference bolometer, in which the selection of thermal conductivity also determines the range of CTIA output voltage.

**Key Words** :  $\mu$ -bolometer, FPA, Thermal analyses, CTIA bias cancellation circuit, High speed operation

### 1. 서 론

비냉각 적외선 검출기 기술은 마이크로 볼로미터 기술을 중심으로 발달하여 그 활용범위를 넓혀가고 있으며, 최근의 연구 방향은 고속, 고밀도, 소형, 저 전력 소모, 저가화의 방향으로 진행되고 있다<sup>[1-6]</sup>. 소형 저전력의 연구방향은 이동형 시스템을 위한 연구방향으로 소형이란 측면에서는 광학계와 함께 고려되어 렌즈의 구경을 줄이기 위한 감도향상이 요구되며 전력 소모를 최소화 하기 위하여 열전냉각기(thermoelectric cooler, TEC)를 사용하지 않고 동작시키는 등의 배터리로 구동되는 시스템이 연구되고 있다<sup>[4-6]</sup>.

고속화의 연구 방향에서는 오늘날 VGA급 초점면 배열에서 60 Hz의 영상을 구현하는 기술로 발전하고 있으며, 고밀도화의 연구방향에서는 반도체 공정기술과 MEMS 기술의 발달로 픽셀 피치는 50, 25 에서  $17\mu\text{m}$ 에 도달하고 있으며 궁극적으로 탐지광의 파장인  $10\mu\text{m}$ 의 피치까지 줄어들 수 있을 것으로 전망하고 있다<sup>[3,4]</sup>. 고속, 고밀도화는 초점면 배열상의 단위면적당 소모되는 전력이 급격히 증가되는 것을 의미한다. 볼로미터 소자가 열적 고립구조를 갖는 점을 고려하면 소자내에서 발생된 열이 방출되기 어려운 구조이므로 고속 동작에서는 단위시간당 신호 취득회수가 증가되므로 고립된 구조에서 온도는 급격히 증가될 것으로 예상된다.

마이크로 볼로미터 초점면배열의 동작을 이해하는 데는 볼로미터의 열적 특성의 이해가 매우 중요하다. 이는 적외선 신호의 변환과정이 대부분 열적인 과정이기 때문이다. 적외선(열)이 입사하여 볼로미터 membrane에 흡수되고 흡수된 열은 저항체의 온도상승을 유발시켜 저항이 변화하고 이를 전기적 신호로 검출해내는 일련의 과정 중에 대부분이 열적인 과정이기 때문이다. 따라서 볼로미터 비냉각 적외선 검출기의 열적 해석은 매우 중요하다. 최근의 볼로미터 초점면 배열의 고속, 고밀도화에 연구에도 열적인 이해가 반드시 필요하며 아울러 주변온도변화에 따른 동작특성 이해에도 열적해석이 매우 중요하게 활용될 것이다<sup>[7,8]</sup>.

본 논문에서는 마이크로 볼로미터 초점면 배열에서 볼로미터 소자의 열적 특성을 살펴본다. 특히 볼로미터 초점면 배열의 열적 과정을 시간에 따라 상세히 살펴본다. 이 결과로 얻어진 볼로미터소자의 온도와 그 저항으로부터 출력신호를 구하였다. 볼로미터 배열소자의 열적 특성을 상세히 살펴보기 위해서 본 연구에서는 피치  $30\mu\text{m}$ 인  $320\times 240$  배열형식의 마이크로 볼로미터 초점면 배열을 가정하고, 이 배열에서 60 Hz의 영상을 획득하는 경우에 배열소자의 열적특성을 살펴본다. 본 연구의 목표는 입사 적외선과 바이어스에 의한 볼로미터 소자의 시간에 따른 온도와 저항을 구하는 것이고, 부수적으로 신호취득 과정에서 발생하는 열의 효과를 상쇄하는 신호처리 과정과 그 결과로 초점면 배열의 출력 신호까지 일련의 신호변환 과정을 살펴보는 것이다. 본 연구에서는 초점면 배열의 소자가 받는 실제의 열적 환경을 모사하기위하여 배열의 형식과 신호 취득방식 등을 규정하였으며, 볼로미터 소자의 열적 특성은  $30\mu\text{m}$  피치의 동급

\* 정 회 원 : 호서대학교 국방과학기술학과 교수 · 공박

E-mail : smanpark@hoseo.edu

접수일자 : 2011년 10월 7일

최종완료 : 2011년 11월 2일

소자의 대표적인 값을 사용하였다. 또한 열해석의 기준 온도는 298 K로 고정하였다.

본 논문에서 사용할 용어를 정의한다. 마이크로 볼로미터 초점면 배열은 영어의  $\mu$ -bolometer focal plane array를 의미하고, 초점면 배열소자(또는 배열소자)는 초점면 배열 내의 단위 소자로서 하나의 볼로미터소자를 의미하며 영어로는 active bolometer로 표기한다. 참조소자 또는 참조 볼로미터소자는 영어의 reference bolometer 또는 reference detector를 의미한다. 마지막으로 볼로미터의 온도가 시간변화에 따라 주기적으로 일정한 범위에서 변하는 상태를 시간에 따른 변화가 없는 정상상태(steady-state)와 구분하여 유사정상상태(quasi-steady-state)로 부르기로 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 이론적 배경

마이크로 볼로미터의 열적특성의 기술은 열 평형 방정식에서 출발한다. 볼로미터에 단위시간당 유입되는 열량은 볼로미터의 저항체의 온도를 상승시키고 일부는 외부로 유출되어 열평형을 이룬다. 이를 식 (1)로 표현할 수 있다<sup>[8-12]</sup>.

$$H \frac{dT_d}{dt} + K(\Delta T) = P_{IR} + P_{Bias} \quad (1)$$

여기서, H는 볼로미터 소자의 열용량, K는 열전도도이고,  $P_{IR}$ ,  $P_{Bias}$ 는 각각 단위시간당의 입사 적외선 에너지와 볼로미터에 가해지는 bias에 의한 열원이다.  $\Delta T = T_d - T_a$ 이고  $T_d$ ,  $T_a$ 는 각각 볼로미터 저항체와 주변의 온도를 나타낸다. 식 (1)에서 적외선 입사만 있는 경우의 해는 다음의 식(2)로 표현할 수 있다.

$$\Delta T = \frac{P_{IR}}{K} (1 - e^{-t/\tau_{th}}) \quad (2)$$

위식에서  $\tau_{th}$ 는  $\tau_{th} = H/K$ 로 정의되는 열 시정수(thermal time constant)를 나타낸다. 식 (2)에서 정상상태에서 도달 온도는 K에 반비례함을 볼 수 있다. 한편 볼로미터에 작용하던 열원이 소멸되면, 소멸 직후부터 주변과 열 교환으로 열평형이 이루어지는 방향으로 온도가 변해간다. 이때의 온도변화를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\Delta T = \Delta T_0 e^{-t/\tau_{th}} \quad (3)$$

여기서  $\Delta T_0$ 는 열원이 소멸되기 직전의 온도이다.

또한 본 연구에서 사용한 온도변화에 따른 볼로미터의 저항 변화는 다음 식 (4)로 정의되는 저항의 온도계수 (temperature coefficient of resistance, TCR)와 온도변화에 선형화 된 식 (5)를 사용하였다.

$$\alpha = \frac{1}{R_d} \frac{dR_d}{dT} \quad (4)$$

$$R_d = R_{d0} + \Delta R_d = R_{d0} (1 + \alpha \Delta T) \quad (5)$$

바이어스에 의한 온도변화도 식 (2)에서 열 원  $P_{IR}$ 을  $P_{Bias}$ 로 대체하여 동일하게 기술할 수 있다. 결과적으로, 식 (2), (3)으로 볼로미터 소자의 온도변화를, (4) (5)로 저항변화를 기술할 수 있다.

### 2.2 볼로미터에 인가되는 열량과 정상상태의 온도상승

먼저 초점면배열에서 한 소자가 받는 열은 적외선과 바이어스에 의한 두 개의 열이 있으며 이에 대한 온도 변화는 다음 식 (6)로 표현된다.

$$\Delta T_{active} = \Delta T_{bias} + \Delta T_{IR} \quad (6)$$

적외선은 광학계를 통해 초점면 배열에 투영되는 영상신호원이고 이 입사 에너지의 차를 영상신호로 만들어 주는 것이 볼로미터 초점면 배열의 임무이다. 본 논문에서는 일정한 적외선이 초점면배열로 입사하는 상황을 다룬다. 이런 상황은 초점면배열의 측정시에 일정한 온도의 확장된 흑체 (extended black body, EBB) 광원에서 나오는 적외선이 입사되는 상황이다. 본 연구에서는 35°C EBB에서 방출되는 적외선 가운데 8~14 $\mu$ m 구간의 적외선이 단위 면적당 입사되는 에너지, 3.829x10<sup>-3</sup> W/cm<sup>2</sup>를 사용한다. 따라서 피치 30  $\mu$ m의 채움인자(fill factor) 60%인 한 픽셀에 입사되는 적외선 에너지는 20.7 nW가 된다. 또한 이 에너지에 의해 열전도도가 3x10<sup>-8</sup> W/K 인 소자의 온도증가는 식 (2)에 의하여 0.69 K가 된다. 본 연구에서 사용된 볼로미터 소자와 그 초점면 배열의 특성 파라미터를 표 1에 정리하였다. 볼로미터 소자의 열적 파라미터 값은 피치 30 $\mu$ m인 동급의 소자의 대표적인 값이다<sup>[7,8]</sup>. 한편 흑체이외에서 적외선 유입은 무시하였다.

보통 열 발생을 최소화하기 위하여 마이크로 볼로미터 초점면배열에서 바이어스는 펄스로 짧은 시간동안 인가되므로 바이어스에 의한 온도변화는 다음 식 (7)과 같이 쓸 수 있다. 펄스 바이어스에 의한 온도상승은 이 식으로 구할 수 있다.

$$\Delta T_{bias} = \frac{P_{Bias}}{K} (1 - e^{-t/\tau_{th}}) \cong \frac{V_{bias}^2 / R_d}{K} \frac{t}{\tau_{th}} = \frac{V_{bias}^2}{H R_d} t \quad (7)$$

바이어스에 의해 인가되는 열은, 표 1을 참조하여,  $V_{bias} = 2$  V,  $R_d = 200$  k $\Omega$ 이므로 약 20  $\mu$ W가 되며 이 열은 앞서 살펴본 적외선 입사량과 비교하면 1000 배나 되는 열이다. 이 때문에 펄스로 바이어스를 인가하여 열 발생을 최소화한다. 본 연구에서 100  $\mu$ s 동안 바이어스를 인가하므로, 이 펄스 바이어스에 의한 배열소자의 온도상승은  $H = 3 \times 10^{-10}$  J/K와 위식에 의하면 6.7 K나 되어 적외선에 의한 온도 상승분(0.69 K)의 약 10 배나 된다.

### 2.3 바이어스 효과의 상세와 신호취득의 주기

대부분의 마이크로 볼로미터 초점면배열의 동작조건에서 적외선에 의한 열량보다 바이어스에 의한 열량이 훨씬 커서 바이어스에 대한 열량을 적절히 제거하지 않으면 적외선 신호를 구분해 낼 수 없다. 바이어스 상세회로는 바이어스에 의한 신호기여분을 많이 상세시켜줄 수 있다<sup>[8-9,13-14]</sup>. 그림 1은 보고된 바이어스 상세 회로를 나타낸다. 이 회로에서

참조소자의 저항,  $R_{ref}$ 와 배열소자의 저항,  $R_d$ 가 동일한 저항 값을 가지면 CTIA (capacitive transimpedance amplifier)에 입력되는 적분전류  $I_{int}$ 가 0이 된다. 즉  $R_{ref} = R_d$  이고  $V_{ref} = 2V_{bias}$ 이면  $I_{int} = 0$ 이 되어 바이어스에 의한 열이 신호에 기여되는 효과를 모두 상쇄할 수 있다. 이것이 바로 바이어스 효과의 상쇄이다. 이를 식으로 표현하면 다음의 (8)식으로 표현된다.

$$I_{INT} = \frac{V_{bias}}{R_{ref}} \left( 1 - \frac{R_{ref}}{R_d} \right) \quad (8)$$

식 (8)에서  $R_{ref}(t)=R_d(t)$  되도록 하면, 즉 초점면 배열소자와 동일한 열적 특성을 갖는 참조소자를 구현하면 바이어스에 의한 열이 신호에 기여되는 것을 모두 차단할 수 있다. 참조소자를 구현하는 방법으로, 배열소자와 동일한 블로미터로 참조소자를 구현하면 배열소자와 동일한 열적 특성과 저항 값을 갖도록 할 수 있으며 단지 적외선에만 반응하지 않도록 하면 된다. 이렇게 할 수 있으면 바이어스 상쇄가 완전히 이루어 질 것으로 보인다.

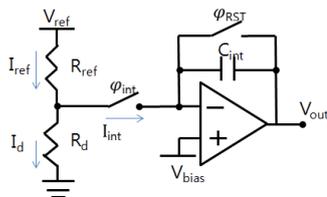


그림 1 본 연구에서 사용된 바이어스 상쇄 회로, 이해를 위해 단순화된 것임.

Fig. 1 The bias cancellation circuit for this study, simplified for clarity.

그림 1에 나타낸 CTIA 회로의 출력전압은 다음 식(9)로 표현된다. 여기서는 적분항이 포함된 항의 값을 논의한다.

$$V_{out} = V_{bias} - \frac{1}{C_{INT}} \int_0^{T_{nr}} I_{INT}(t) dt \quad (9)$$

블로미터 초점면배열에서 이 회로는 바이어스 상쇄에 효과적이지만 기대처럼 완벽하지는 않다. 이런 이유는 참조소자가 실제 초점면 배열소자와 열적으로 서로 다른 상황에 처하게 되기 때문이다. 이 점은 참조소자의 바이어스 인가 주기와 배열소자의 주기가 다른데서 기인한다. 배열소자는 한 화면 시간(frame time,  $T_f$ )당 한 번의 바이어스가 인가되는 반면, 참조소자는 훨씬 많은 바이어스가 인가되므로 그 주기는 매우 짧아지게 된다. 참조소자의 바이어스 주기는 읽어내는 방식과 참조소자 수에 따라 달라진다<sup>[15]</sup>.

본 연구의 바이어스 주기는 다음과 같이 결정되었다. 먼저 신호취득회로는 컬럼 방식<sup>[15]</sup>으로 가정하여 한 화면시간,  $T_f$ 가 한 컬럼을 읽는 시간(column time,  $T_{col}$ )과 동일하게 하였고, 60 Hz로 화면을 획득하면  $T_f = T_{col} = 16$  ms가 된다. 즉 배열소자는 16 ms 주기동안 100  $\mu$ s 바이어스가 인가되고 나머지 시간동안 냉각되는 주기를 반복한다. 한편, 참조소자의 주기는 컬럼당 참조소자 수에 의존한다. 참조소자

의 구현은 배열에 참조소자 수만큼의 열(row)를 추가하여 참조소자를 형성할 수 있다<sup>[14-16]</sup>. 초점면 배열 내에 컬럼당 M개의 배열소자가 있는 경우  $T_{col}/M$ 의 주기로 컬럼 신호를 읽어내므로 컬럼당 참조소자 수를 n이라 하고 참조소자의 바이어스 주기를  $T_{ref}$ 라 하면  $T_{ref}$ 는 다음 식으로 표현된다.

$$T_{ref} = n \frac{T_{col}}{M} \quad (10)$$

즉 참조소자의 바이어스 주기는 컬럼당 참조소자 수에 비례한다. 위식으로 8 행(row)의 참조소자를 갖는 320x240 60 회의 화면을 얻는 경우  $T_{ref}=0.53$  ms 가 되고, 16행인 경우 1.03 ms가 된다. 본 연구에서는  $T_{ref}=0.5$ 와 1.0 ms로 하였다. 즉 참조소자는  $T_{ref}$  마다 100  $\mu$ s 바이어스가 인가되고 나머지 시간동안 냉각되는 주기를 반복한다. 이는 배열소자의 주기 16 ms와 비교하면 32배와 16배의 짧은 주기이며 따라서 그만큼의 많은 열이 발생한다.

표 1 본 연구에 사용한 블로미터 소자와 FPA의 파라미터.

Table 1 The parameters of  $\mu$ -bolometer devices and FPA used in this study.

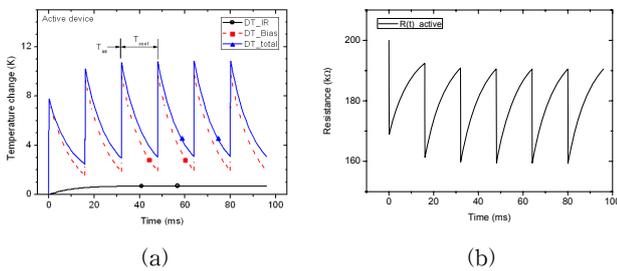
Parameter name	symbol	value	unit	comments
<b>Active <math>\mu</math>-Bolometer device parameters</b>				
Pixel pitch		30x30	$\mu$ m <sup>2</sup>	
Optical fill factor		60	%	
Thermal conductivity	K	$3 \times 10^{-8}$	W/K	
Heat capacity	H	$3 \times 10^{-10}$	J/K	
Membrane absorption coefficient	$\epsilon$	1		
Bolometer resistance	$R_{d0}$	200	k $\Omega$	at 298 K
TCR	$\alpha$	-0.02	1/K	
<b>Ref. <math>\mu</math>-Bolometer device parameters</b>				
Thermal conductivity	K	$30 \times 10^{-8}$	W/K	for $T_{ref}=1.0$ ms
		$50 \times 10^{-8}$	W/K	for $T_{ref}=0.5$ ms
Heat capacity	H	$3 \times 10^{-10}$	J/K	
Membrane absorption coefficient		0		No IR absorption
Bolometer resistance	$R_{ref0}$	200	k $\Omega$	at 298 K
TCR	$\alpha$	-0.02	1/K	
# of ref. bolometers/col.	n	8	ea	for $T_{ref}=0.5$ ms
		16	ea	for $T_{ref}=1.0$ ms
<b><math>\mu</math>-Bolometer FPA parameters</b>				
Format		320x240		NxM format
Bolometer bias	$V_{bias}$	2	V	const. volt pulsed bias
	$C_{int}$	20	pF	Columnwise readout with CTIA
Readout type	$T_{int}$	100	$\mu$ s	
	$T_r$	16	ms	60 frame/s
IR window transmission		100	%	
Incident IR power	$P_{ir}$	20.7	nW	35 $^{\circ}$ CEBB
Ambient temperature	$T_a$	298	K	constant

참조소자는 열적으로 배열소자와 동일하게 구현되므로 TCR도 동일하게 된다. 따라서 바이어스 상쇄를 효과적으로 달성하기위하여 바이어스에 의한 배열소자와 참조소자의 저항변화가 유사하게 되도록 하여야한다. 즉 바이어스에 의한 참조소자의 온도 상승을 배열소자의 온도 상승과 유사하게 되도록 억제하여야 한다. 참조소자의 온도상승을 억제하는 방법은 참조소자수를 증가시키는 방법과 열전도도를 증가시키는 방법이 있다. 참조소자수를 늘리는 것은 초점면 배열의 면적이 증가하는 것을 의미하므로 계속 늘려갈 수는 없

다. 따라서 참조소자의 온도 상승을 억제하기 위한 효과적인 방법은 열전도도를 증가시키는 방법이다. 식 (7)에 의하면 일정한 열원에 대한 온도변화는 열전도도  $K$ 에 반비례함을 알 수 있다<sup>[8]</sup>.

**2.4 열 해석 결과와 논의**

그림 2(a)는 배열소자의 온도를 시간에 따라 그린 것이다. 온도 상승과 하강이 한주기를 이루며, 한주기내에 100  $\mu$ s 동안 바이어스 인가로 온도가 상승되는 구간( $T_{int}$ )과 나머지 냉각되고 있는 구간( $T_{cool}$ )이다. 앞에서 논의한 것처럼 본 연구에서는 바이어스에 의한 발열시간( $T_{int}$ )과 냉각시간( $T_{cool}$ )의 합이  $T_f$ 이고  $T_f=T_{col}=16$  ms이다. 이는 화면을 60 Hz로 획득할 때 한 화면에 소요되는 시간이다.



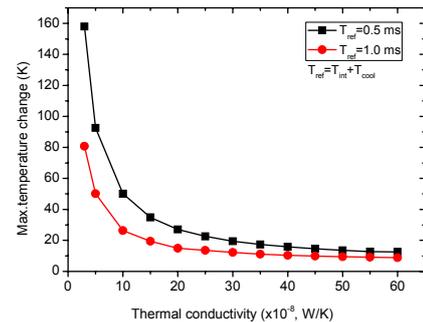
**그림 2** 볼로미터 소자의 온도변화(a)와 저항 변화 (b). 아래의 검정색 실선은 적외선에 의한 온도의 상승이고, 중간의 점선은 바이어스에 의한 온도의 변화이며 위의 파란색 실선은 두 온도변화의 합이다.

**Fig. 2** Temperature change(a) and resistance change(b) of an active bolometer in FPA. Black line represents temperature change by incident IR, dot red line by bias heat, and blue line is the sum of the two in (a).

이 그림에서 40ms 이하에서 관찰할 수 있는 현상은 온도가 떨어지다가 평형 상태에 도달하기 전에 다시 열이 인가되어 온도가 상승되고 있는 상황을 보이고 있으며, 60 ms 이상의 시간에서는 온도의 상승과 하강이 일정한 구간에서 반복되고 있음을 볼 수 있다. 본 연구에서 이 구간을 유사정상상태(quasi-steady-state)로 표현한다. 그림 2(a)에서 아래의 실선은 35  $^{\circ}$ C인 확장된 흑체에서에서 나온 적외선에 의한 온도 변화를 나타내고 있으며, 점선으로 표시된 라인은 바이어스에 의한 온도변화이며, 위의 실선은 두 온도변화의 합을 나타내고 있다. 적외선에 의한 온도변화는 정상상태에서 볼로미터 저항체의 온도가 0.689  $^{\circ}$ C까지 상승되고 있음을 볼 수 있고, 바이어스에 의한 온도는 이보다 약 10배 큰 약 7.1  $^{\circ}$ C까지(60 ms 이후의 바이어스 인가시간동안의 온도 상승은 2.64에서 9.73 $^{\circ}$ C까지) 상승되고 있음을 볼 수 있다. 앞 절에서 단순하게 구한 6.7 K보다 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 2에서 더 관찰할 점은 유사정상상태에서 볼로미터의 온도변화가 약 3.1~10.8  $^{\circ}$ C까지 변화되고 있다는 점이다. 그림 2(b)는 (a)에 나타난 온도변화에 따른 볼로미터 저항의 변화를 나타낸 것으로 저항체가 음의 온도

계수(temperature coefficient of resistance, TCR)를 갖는다는 점을 고려하면 기대치와 잘 일치한다.

앞 절에서 언급한대로, 바이어스 상체를 효과적으로 하기 위하여 참조소자의 온도상승억제가 필요하며, 이는 참조소자의 열전도도를 증가시키면 가능하다. 본 연구에 사용할 참조소자의 열전도도는 그림 3에서 결정하였다. 그림 3에는 열 전도도에 따른 참조소자의 바이어스에 의한 최고 도달온도를 나타내었다. 이 계산에는 표 1의 볼로미터 소자와 초점면배열 파라미터를 활용하였고 소자의 열 특성을 결정하는 열전도도,  $K$ 와 열용량,  $H$  중에  $H$ 를  $3 \times 10^{-10}$  J/K로 고정하고  $K$ 를 변화시킨 후 유사정상상태에서의 온도변화를 구하였고 그 최고온도를 그림 3에 나타내었다. 앞서 바이어스에 의한 초점면소자의 온도 변화폭이 3.35~10.48 K임을 고려하여 이와 근접한 온도에서 변화폭도 유사하게 되는  $K$ 값을 택하였다. 참조소자수를 8로 정하여  $T_{ref}$ 가 0.5ms와 16으로 정하여 1.0 ms일 경우 참조소자의  $K$  값을 각각  $K=50 \times 10^{-8}$ 와  $30 \times 10^{-8}$  W/K로 선택하였다. 이런 참조소자를 선택함으로써 참조소자와 실제 볼로미터 사이의 온도차는 5K 미만으로 유지가능하다. 본 연구에서는 볼로미터의 열 해석 자체에 초점이 있으므로 참조소자를 최적화하지는 않았다.



**그림 3** 참조소자의  $K$  값에 따른 유사정상상태에서의 최대 상승온도.  $T_{ref}=0.5$  ms일 경우  $K=50 \times 10^{-8}$  W/K,  $T_{ref}=1.0$  ms일 경우  $K=30 \times 10^{-8}$  W/K로 선택하였다.

**Fig. 3** Maximum temperature change at quasi-steady-state of a reference bolometer as a function of its thermal conductivity  $K$ . The selected  $K$ s are  $K=50 \times 10^{-8}$  and  $30 \times 10^{-8}$  W/K for  $T_{ref}=0.5$  and 1.0 ms respectively.

이제 두 개의 참조소자에 대한 온도 변화를 구할 수 있다. 그림 4는 두 개의 참조소자에서 펄스 바이어스에 의한 온도변화를 나타내었다. 이 그림에서 볼 수 있듯이  $T_{ref}=0.5$  ms,  $K=50 \times 10^{-8}$  W/K인 참조소자에서 유사정상상태의 온도 변화범위는 4.48~12.22 K,  $T_{ref}=1.0$  ms,  $K=30 \times 10^{-8}$  W/K에서 1.20~8.90 K 이었다. 그림 4의 (a), (b)를 비교하면  $T_{ref}=0.5$  ms인 참조소자에서는 바이어스 인가 시간이 두 배가 되므로 발열양도 두 배가 되나 열전도도가 1.67배 증가되었으므로 최고 온도가 1.2배의 증가될 것으로 예상할 수 있으나 실제로는 1.37배 증가하였다. 이는 냉각 시간도 약 2 배로 줄었기 때문이다.

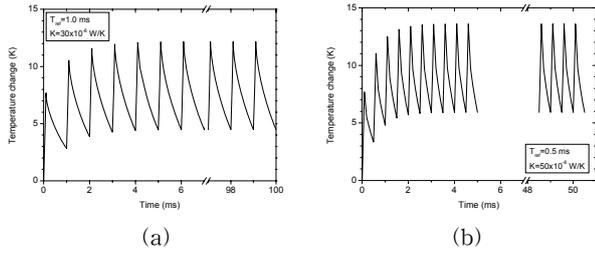


그림 4 본 연구에서 선택한 두 참조소자의 온도 변화.  
 (a)  $T_{ref}$ 가 0.5 ms이고  $K=50 \times 10^{-8}$  W/K 참조소자  
 (b)  $T_{ref}$ 가 1.0 ms이고  $K=30 \times 10^{-8}$  W/K 참조소자

Fig. 4 Temperature change of the two selected reference bolometers selected for this study.

- (a) Reference bolometer of  $T_{ref} = 0.5$  ms and  $K=50 \times 10^{-8}$  W/K
- (b) Reference bolometer of  $T_{ref} = 1.0$  ms and  $K=30 \times 10^{-8}$  W/K.

2.5 유사정상상태의 출력특성과 그 논의

그림 5에는 유사정상상태에서의 FPA내의 볼로미터와 참조소자의 온도변화, 그리고 그에 따른 저항 변화를 나타내었다. 또한 그림 5에서 나타난 온도와 저항변화의 범위를 표 2에 정리하였다. 표 2에서 볼 수 있듯이 배열소자의 저항이 189~158 kΩ 까지 변화하는 동안 두 참조소자에서는 각각 176~146 kΩ, 182~151 kΩ 까지 변화하고 있음을 볼 수 있다. 이 저항의 차이가 CTIA의 출력 신호의 크기를 결정하며 아직도 이 신호 속에는 적외선 영상신호 이외의 바이어스 효과 등의 잡음이 혼재하고 있음을 짐작할 수 있다. 배열소자의 저항변화가 적외선과 바이어스에 의해 기여되는 점을 생각하면, 참조소자의 저항변화는 바이어스에 의한 기여만 있으므로 배열소자의 저항변화보다 다소 작아야 됨을 알 수 있다. 이 저항 값의 변화에서 알 수 있는 점은 아직도 바이어스의 영향이 존재하고 있다는 점이다. 그림 5에서 관찰할 수 있는 점은 온도와 저항의 변화가 바이어스 인가 시간에 대하여 선형이 아니라는 점이다. 즉 식 (7)으로 예측한 선형성에서 보다 다소 급한 기울기를 갖는 방향으로 변해가고 있음을 볼 수 있다. 이 현상은 식 (7)에서 볼로미터 소자의 저항이 상수가 아니고 시간의 함수로 변하기 때문에 나

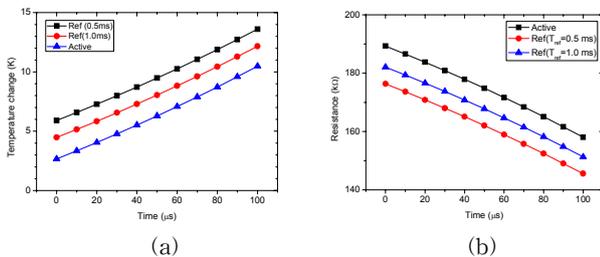


그림 5 유사정상상태에서의 볼로미터와 참조소자의 온도 변화(a)와 저항 변화 (b).

Fig. 5 Temperature change (a) and resistance change (b) of a active bolometer and two reference detectors in quasi-steady-state.

타나는 현상으로 생각된다. 여기서 다시 언급할 점은 본 연구는 열해석에 초점이 있으므로 참조소자를 개략적으로 선택하여 열해석을 진행한다는 점이다.

그림 6에는 앞서 언급한 CTIA회로의 입력 전류( $I_{int}$ )와 적분기의 출력전압을 나타내었다. 그림 6에서 사각형과 원 표시된 선은 각각 참조소자의 바이어스 주기가  $T_{ref}=0.5$  ms, 1.0 ms인 경우에 선택된 참조소자가 사용되는 경우를 표시하고 삼각형 표시된 선은 바이어스 상쇄가 완벽하여 단지 적외선에 의한 신호전류와 그 때의 출력전압을 나타낸다. 적분전류는 식 (8)과 그림 5의 저항 값으로부터, 출력전압은 식 (9)와 적분 전류로부터 구하였다. 한 가지 언급할 점은 바이어스 상쇄가 이상적이어서 적외선에 의한 출력만 보이는 경우는 위 그림에서는 절대값을 취한 결과다.

이상적으로 바이어스 효과가 모두 상쇄될 경우의 출력전압은 배열소자에서  $\Delta R_{d,bias} + \Delta R_{d,IR}$  를 고려하고 참조소자에서는  $\Delta R_{ref,bias}$  만을 고려하는데 단지  $R_{ref,bias}(t) = R_{d,bias}(t)$  되도록 하면 된다. 이렇게 하여 적외선에 의하여 발생하는 적분 전류를 구하면 197.1 nA이고 100μs에서 출력 전압은 0.985V가 된다. 즉 바이어스 상쇄효과가 완벽하면 35°C EBB 광원에 대하여 출력전압이 0.985V가 된다는 것이다. 한편 바이어스 상쇄 효과를 개략적으로 구할 수 있다. 이는 출력범위에 대한 감을 얻기 충분한 자료가 된다. 바이어스 효과가 전혀 상쇄되지않는 경우는  $\Delta R_{d,bias}$ 를 모두  $\Delta R_{d,IR}$  로 취급하여 구할 수 있다. 즉 바이어스에 의한 저항변화는 없고 저항변화는 모두 적외선에 의한 것으로 본다는 것이고 따라서 참조소자에서는 저항변화가 없다. 이런 가정 하에 적분 전류를 구하면 2 μA가 되고, 출력전압은 10 V가 된다. 즉 바이어스 상쇄효과가 전혀 없어 바이어스에 의하여 발생한 열이 모두 신호에 기여하면 출력이 10V가 된다는 것이다. 바이어스 상쇄효과와 유무에 따라 출력전압을 구하였으므로 두 가지  $T_{ref}$ 에 대한 출력에서 상쇄효과를 구할 수 있다. 여기서 출력전압은 저항 변화에 선형으로 변한다고 가정하여 선형화하였다. 이 결과를 표 3으로 정리하였다. 본 연구에서 선택한 열전도도를 갖는 두 참조소자, 즉  $T_{ref}=0.5$  ms일 때  $K=50 \times 10^{-8}$  W/K인 참조소자와  $T_{ref}=1.0$  ms일 때  $K=30 \times 10^{-8}$  W/K 참조소자를 활용하면 바이어스 상쇄효과가 각각 68.7과 48.8%를 얻을 수 있다는 것이다. 앞서 언급한대로 참조소자를 개략적으로 선택한 결과이다.

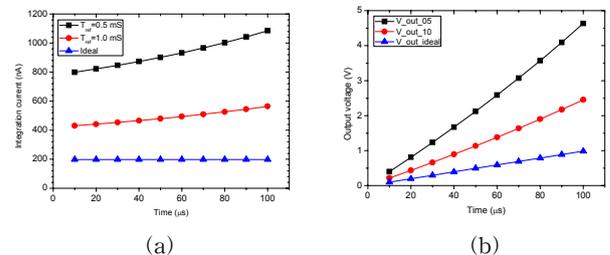


그림 6 CTIA column 증폭회로의 적분전류(a)와 그 출력단의 전압(b).

Fig. 6 Integration currents and output voltages of the CTIA column amplifier with the ref. devices of  $T_{ref}=0.5$  and 1.0 ms.

**표 2** FPA내의 볼로미터소자와 두 참조소자에서의 온도와 저항의 변화 범위.

**Table 2** Temperature and resistance ranges of a active bolometer and two reference detectors.

	$\Delta T$ range (K)	$\Delta R$ range (k $\Omega$ )
Active bolometer device	2.666~10.482	158~189
Ref. device 1 (T <sub>ref</sub> =0.5ms)	5.913~13.605	146~176
Ref. device 2 (T <sub>ref</sub> =1.0ms)	4.476~12.169	151~182

앞서 언급한대로 바이어스 상쇄가 이상적으로 되는 경우에는 참조소자의 저항변화는 배열소자의 저항변화보다 다소 작아야 되므로 저항으로 보면 참조소자의 저항이 배열소자의 저항보다 다소 크게 되도록 K값을 정하는 것이 효과적이다. 식 (8)에서도 볼 수 있듯이, 참조소자의 저항이 배열소자의 저항보다 클 때 적분전류가 음의 값을 갖게 된다.

**표 3** 바이어스 상쇄효과.

**Table 3** Bias cancellation effect.

출력전압 (V)	상쇄 효과 (%)	비고
-0.9853	100	only by IR
2.454	68.7	T <sub>ref</sub> =1.0ms, n=16
4.636	48.8	T <sub>ref</sub> =0.5ms, n=8
10	0	no cancellation

실제적으로는 참조소자의 열전도도 K를 증가시켜서 온도 상승을 억제하게 되므로 참조소자의 저항은 배열소자의 저항보다 크게 변화하지 않도록 할 수 있다. 참조소자의 저항이 배열소자의 범위 이내로 존재하도록 K값을 조정하면 출력전압은 감소하고 상쇄효과는 커질 것으로 예측된다.

실제 설계에서는 출력전압중 후반부가 sampling 되어 영상신호로 활용되므로 주로 활용되는 온도 구간을 고려하여 이때의 출력전압을 이상적인 출력전압에 근접하도록 참조소자를 설계할 수 있다. 단지 고려할 점은 동작온도 구간에서 적분 시간 중에 적분기의 전하용량이 포화되지 않도록 해야 한다.

### 3. 결 론

마이크로 볼로미터 초점면배열의 소자에 대하여 시간에 따른 온도와 저항변화를 정량적으로 분석하였다. 피치가 30 $\mu$ m인 320x240 배열의 마이크로 볼로미터 배열에서 60 Hz로 동작 시키는 경우 볼로미터 배열소자 및 선택된 두 종류의 참조소자에 대한 열 해석으로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

가. 배열 소자의 온도 변화는 35  $^{\circ}$ C의 확장된 흑체광원의 적외선에 의한 온도 상승은 0.689  $^{\circ}$ C이었고, 바이어스에 의해서는 약 7.1  $^{\circ}$ C로 바이어스에 의한 온도 상승이 10배 이상 된다. 따라서 바이어스에 의한 온도상승이 신호에 기여되는 것을 차단하지 않으면 적외선 신호를 구분할 수 없는 상황이 된다.

나. CTIA 바이어스 상쇄회로를 갖는 초점면 배열에서 이상적인 바이어스 상쇄 효과는 참조소자의 열적 특성이 배열소자의 열적 특성과 동일할 때 달성할 수 있다.

다. 참조소자의 바이어스 주기는 배열 소자의 주기보다 매우 짧아서 온도 상승이 훨씬 커질 수 있으며, 효과적인 바이어스 상쇄를 달성하기 위해서는 참조소자의 온도상승을 배열소자의

온도상승 범위 내로 억제하여야 한다.

라. 실제적인 측면에서 참조소자의 열전도도를 증가시킴으로써 온도상승을 효과적으로 억제시킬 수 있다.

마. CTIA 바이어스 상쇄회로를 갖는 초점면 배열에서 참조소자의 열전도도는 자체의 온도상승을 범위를 결정하고 따라서 적분전류 및 출력전압의 범위를 결정한다.

바. 본 연구의 두 종류의 참조소자에 대하여 CTIA 적분전류와 출력전압을 구하고 바이어스 상쇄효과를 살펴본 결과로 K=50x10<sup>-8</sup>, 30x10<sup>-8</sup> W/K인 참조소자를 갖는 초점면배열에서 바이어스 상쇄효과는 각각 48.8과 68.7% 정도 됨을 알 수 있다.

### 참 고 문 헌

- [1] D. Murphy, M. Ray, J. Wyles, C. Hewitt, R. Wyles, E. Gordon, K. Almada, T. Sessler, S. Baur, D. Van Lue and S. Black, "640 x 512 17  $\mu$ m Microbolometer FPA and Sensor Development", Proc. of SPIE 6542, pp. 65421Z-1-10, 2007.
- [2] F. Niklaus, C. Jansson, A. Decharat, J. Källhammer, H. Pettersson and G. Stemme, "Uncooled Infrared Bolometer Arrays Operating in a Low to Medium Vacuum Atmosphere: Performance Model and Tradeoffs", Proc. of SPIE 6542, pp. 65421M-1-12, 2007.
- [3] M. Almasri, B. Xu and J. Castracane, "Amorphous silicon two-color microbolometer for uncooled IR detection", IEEE Sensors journal, vol. 6, no. 2 2006.
- [4] P. Ericsson, A.C. Fisher, F. Fosberg, N. Roxhed, B. Samel, S. Savage, G. Stemme, S. Wissmar, O. Oeberg, F. Niklaus, "Towards 17  $\mu$ m pitch heterogeneously integrated Si/Ge quantum well bolometer FPAs", Proc. of SPIE 8012, pp 801212-1-9, 2011.
- [5] J.L. Tissot, IR detection with uncooled sensors, Infrared Physics & Technology 46. 147 - 153, 2004.
- [6] C. Li, G. Skidmore, and C. Han, "Uncooled VOx Infrared sensor development and application", Proc. of SPIE 8012, pp 80121N-1-8, 2011.
- [7] M. Kohin and N. Butler, "Performance limits of uncooled VOx microbolometer focal plane array", Proc. of SPIE 5406, pp 447-453, 2004.
- [8] M. Tepegoz, F. Civitchi, and T. Akin, "An optimum reference detector design for uncooled microbolometer FPAs", Proc. of SPIE 6940, pp 694028-1-8, 2008.
- [9] W. Parrish, J. Woolaway, "Improvements in uncooled systems using bias equalization", Proc. of SPIE 3698, pp 748-755, 1999.
- [10] E. L. Dereniak and G. D. Boreman, Infrared Detectors and Systems, Wiley, New York, pp. 395-414, 1996.
- [11] R. A. Wood, "Monolithic Silicon Microbolometer Arrays," in Uncooled Infrared Imaging Arrays and Systems, P. Kruse and D. Skatrud, Editors,

Semiconductors and Semimetals, Academic Press, New York, pp. 43-121, 1997.

- [12] P. Eriksson, Jan Y. Anderson and G. Stemme, "Thermal Characterization of Surface-Micromachined Silicon Nitride Membranes for Thermal Infrared Detectors", J. MEMS, Vol. 6, No. 1, pp. 55-61, March 1997.
- [13] D. Murphy, W. Radford, M. Ray, S. Propst, A. Kennedy, J. Kojiro, J. Woolaway, K. Soch, R. Coda, G. Lung, E. Moody, D. Gleichman, and S. Baur, "320× 240 silicon microbolometer uncooled IRFPAs with on-chip offset correction", Proc. of SPIE Vol. 2746, pp. 82-92, 1996.
- [14] C.H. Hwang, D.H. Woo, Y.S. Lee, and H.C. Lee, "Readout integrated circuit for microbolometer with an analog non-uniformity correction", Proc. of SPIE 5987, pp 59870P-1-8, 2005.
- [15] D. Jakonis, C. Svensson, C. Jansson "Readout architectures for uncooled IR detector arrays", Sensors and Actuators 84, pp. 220-229, 2000.
- [16] R. A. Richwine, Y. R. Puri, A. K. Sood, R. S. Balcerak, S. Horn, G. Baker and M. Wilson, "Microbolometer Sensor Model for Performance Predictions and Real-Time Image Generation of Infrared Scenes and Targets, Proc. of SPIE Vol. 7055, pp. 7055T-1-11, 2008.

## 저 자 소 개



### 박 승 만 (朴 勝 萬)

1960년 5월 20일생. 1984년 한양대 물리학과 졸업, 1986년 동 대학원 졸업(석사), 1997년 KAIST 전기 및 전자공학과 졸업(박사), 1987~2008. 10 국방과학연구소(연구원, 선임연구원, 책임연구원), 2008. 11~현재 호서대학교 국방과학기술학과 교수.

Tel : 041-540-9682

Fax : 041-540-9548

E-mail : smanpark@hoseo.edu