

## 비냉각 검출기를 이용한 소화기용 저전력 열상모듈 설계

Low Power IR Module Design for Small Arms Using Un-cooled Type Detector

**성 기 열\***                      **곽 동 민\***                      **곽 기 호\***                      **김 도 종\***                      **유    준\*\***  
Sung, Gi-Yeul                      Kwak, Dong-Min                      Kwak, Ki-Ho                      Kim, Do-Jong                      Lyou, Joon

### ABSTRACT

This paper introduces the design techniques of an IR module using the 2-D array un-cooled type infrared detector which is applied to the individual combat weapon. Considering the size and weight of the hand carried weapon system, we used a very small-sized detector and applied an adaptive temperature control algorithm so that the operation consumed with low power can be possible. We applied the AR (Auto Regressive) filter to improve the signal-to-noise ratio in a thermal image processing step. We also applied the plateau equalization and boundary enhancement techniques to improve the visibility for human visual system.

주요기술용어(주제어) : Infrared(적외선), Uncooled Detector(비냉각 검출기), Thermo-Electric Cooler Control(TEC 제어), Non-Uniformity Correction(비균질성 보정), Plateau Equalization(평탄평활화)

### 1. 머리말

복합형소총은 KE(Kinetic Energy)탄과 HE(High Explosive)탄 발사가 복합된 개인화기로서 사격통제장치를 탑재하여 은폐된 표적의 상공에서 공중폭발탄이 작동함으로써 적을 제압할 수 있는 무기체계이다. 사격통제장치에 탑재되는 열상장비는 야간전투 상황에서 인원에 대한 실시간 탐지 등을 통해 신속한 대응이 가능하도록 유효거리에 대한 영상정보를 제공하여야 한다.

소총과 같은 개인 휴대형 화기에 탑재되는 전자장

비의 설계에 있어서 가장 중요한 요소는 제한된 크기와 전력으로 요구성능을 충족하는 것이다. 최근 3세대 열상장비의 기술적 발전을 통해서 '90년대 중반 이후 320×240 배열의 비주사방식(staring type)의 비냉각 적외선 검출기가 실용화 되었고<sup>[1]</sup>, 최근에는 센서 크기의 소형화로 25 $\mu$ m 피치를 가지는 640×480 급의 검출기가 개발되어 실용화가 진행되고 있다.

본 논문에서는 25 $\mu$ m 피치, 320×240 배열을 가지는 이스라엘 SCD(Semi-Conductor Devices)사의 비냉각 검출기인 'BIRD(Bolometric InfraRed Detector)'를 이용하여 복합형소총에 최적화된 열상모듈 설계 방법을 소개한다. 제한된 광학계 구경과 전력으로 최적의 성능을 구현하기 위해서 디지털 신호를 처리하는 통합제어보드에는 FPGA(Field Programmable Gate Array)와 함께 ARM(Advanced RISC Machine) 프로세서를 적용하였으며, 상대적으로 많은 전력소모가

† 2007년 8월 8일 접수~2007년 10월 18일 게재승인

\* 국방과학연구소(ADD)

\*\* 충남대학교(CNU)

주저자 이메일 : addsky@add.re.kr

필요한 TEC(Thermo-Electric Cooler) 제어를 위해서 적응형 온도 제어 알고리즘을 적용하였다.

열영상 처리단계에서는 검출기 출력의 불균일성을 보정하기 위해서 Coarse NUC(Non-Uniformity Correction)와 Fine NUC로 구성된 이단계 보정기법을 적용하고, 시간 영역에서 프레임 간 AR(Auto Regressive) 필터링을 적용하여 신호 대 잡음비를 개선하였다.

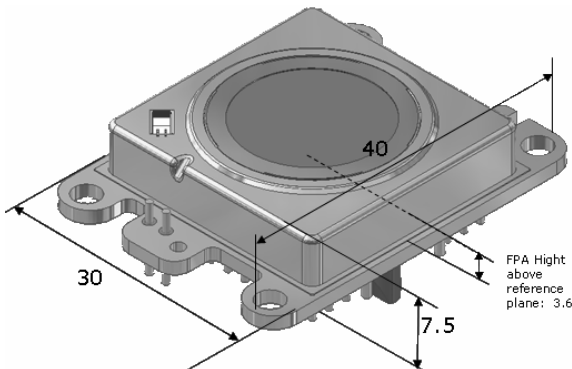
본 논문의 구성은 먼저 2장에서 소형, 저전력 시스템을 위한 열상발생모듈의 하드웨어 설계기법을 다루고, 3장에서는 열상처리 알고리즘을 설명한다. 4장에서는 구성된 시스템을 적용한 실험결과를 제시하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

## 2. 하드웨어 설계

복합형소총의 사격통제장치는 통합제어모듈, 열상 발생모듈, 거리측정모듈, 전원공급모듈, 영상전시모듈, 신관설정모듈, 스위치모듈 그리고 센서모듈로 구성되어 있으며, 열상발생모듈은 검출기와 열상광학계 및 전자제어부로 구성되어 있다.

### 가. 열상 검출기

열상발생모듈에 적용한 검출기는 이스라엘 SCD사에서 개발한 비냉각형 검출기로 픽셀 피치는 25 $\mu$ m 급이며, 320 $\times$ 240 배열을 지원한다. 검출기의 외형 및 크기는 그림 1과 같고, 세부사양은 표 1과 같다. 볼로



[그림 1] BIRD 검출기 외형 및 크기

[표 1] 검출기 세부사양

항 목	세부사양
Array format	320 $\times$ 240(USA) or 384 $\times$ 288(Europe)
Pixel Pitch	25 $\mu$ m
Bolometer Material	VOx(Vanadium Oxide) Microbolometer
NETD	$\leq 50\text{mK} = 250\text{K}, 25^\circ\text{C}$ and f/1
Operating Temperature	-35 $^\circ\text{C}$ to + 65 $^\circ\text{C}$ (operating) -46 $^\circ\text{C}$ to + 71 $^\circ\text{C}$ (storage)
Frame-rate	60/30Hz @ 320 $\times$ 240 Format
Video Output	2.5 $\pm$ 1.5 V(1V~4V)
Power Dissipation	320 $\times$ 240 array : P $\leq$ 200mW
Environmental test (shock, vibration)	MIL-STD-810E, Method 514.4
Master Clock	20MHz max. < 13MHz. USA

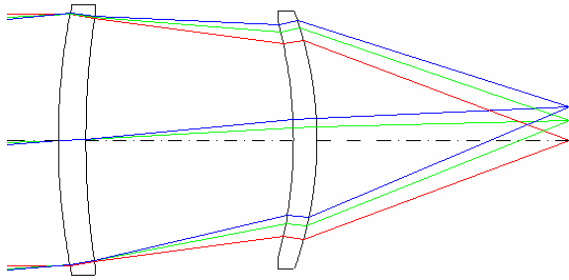
메터 물성은 바나듐옥사이드 계열이며 대표적인 성능으로 F-number 1.0에서 50mK 미만의 NETD(Noise Equivalent Temperature Difference) 값을 가진다.

### 나. 열상 광학계

열상광학계는 그림 2와 같이 2매의 비구면 렌즈를 이용해서 설계하였으며, 주요 설계제원은 표 2와 같다.

[표 2] 열상광학계 설계제원

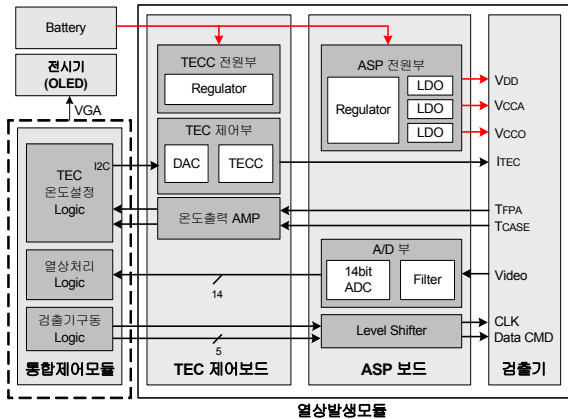
항 목	제 원
열상센서	8mm $\times$ 6mm(해상도 320 $\times$ 240)
렌즈매수	2매(비구면)
유효경	30mm
유효초점거리	45.72mm
F#	1.52
시계	10도 $\times$ 7.5도
대물초점거리	5m~ $\infty$



[그림 2] 열상광학계

다. 전자제어부

열상발생모듈의 전자제어부는 ASP(Analog Signal Processing) 보드, TEC 제어보드, 전시기 및 통합제어모듈로 구성되어 있다. 검출기의 비디오 출력은 14bit AD 변환을 거친 후 통합제어모듈의 영상처리부로 전달된다. 그림 3은 열상발생모듈 전자제어부의 구성도이다.



[그림 3] 열상발생모듈 전자제어부 구성도

1) ASP 보드

ASP 보드는 검출기에 필요한 바이어스를 공급하고, 검출기로부터 출력되는 센서출력을 14bit AD 변환하여 통합제어 모듈로 전달하는 역할을 한다.

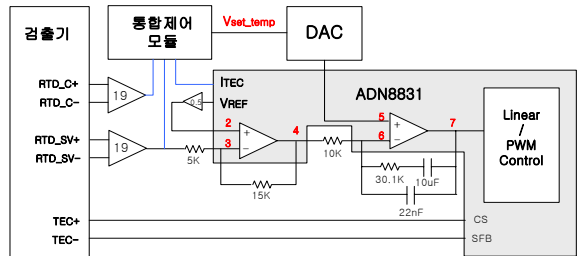
2) TEC 제어보드

TEC 제어보드는 검출기에서 획득한 FPA(Focal Plane Array) 온도와 검출기 케이스 온도(0.00732V/°C)를 증폭하여 통합제어모듈에 전달하고, 통합제어

모듈에서 입력받은 제어온도 명령을 DAC에서 아날로그 전압으로 전환하여 TEC 제어칩의 온도 기준값으로 사용하도록 설계되었다. 그림 4는 Analog Device사의 ADN8831 콘트롤러를 이용한 열상발생모듈의 온도 적응형 TEC 제어구조이다. 그림 4에서와 같이 검출기의 2채널 온도출력 중에서 검출기 주변온도를 나타내는 케이스 온도(RTD\_C)는 19배 증폭되어 통합제어모듈 ARM 프로세서의 ADC 입력으로 연결된다.

TEC 제어를 위한 목표온도 설정은 전력소모를 고려하여 적응적 온도제어 기법을 사용한다. 통합제어모듈의 ARM 프로세서는 현재 사격통제장치 내부의 온도 상승효과를 고려하여 열상 전원인가 후 입력된 케이스 온도 + $\Delta T$ 로 설정하는 명령을 DAC에 전송함으로써 일반적인 고정온도 제어방식의 TEC 제어를 사용하지 않고 주변온도에 따른 최소의 전력만을 이용해서 제어가 가능하도록 하였다. 그림 4에 적응적 온도제어를 위한 데이터흐름과 회로구조를 나타내었다.

TEC 콘트롤러는 피드백되는 FPA 온도출력과 DAC 출력 전압에 의해서 설정온도로 수렴할 수 있도록 PI 제어를 수행한다. 또한 TEC 전류와 FPA 온도 출력은 모니터링 목적으로 통합제어모듈로 전달된다.



[그림 4] 온도 적응형 TEC 제어구조

3) 전시기

전시기는 VGA(Video Graphics Array) 신호 입력을 받는 저전력의 마이크로 OLED(Organic Light Emitting Diode)를 사용하였다.

4) 통합제어모듈

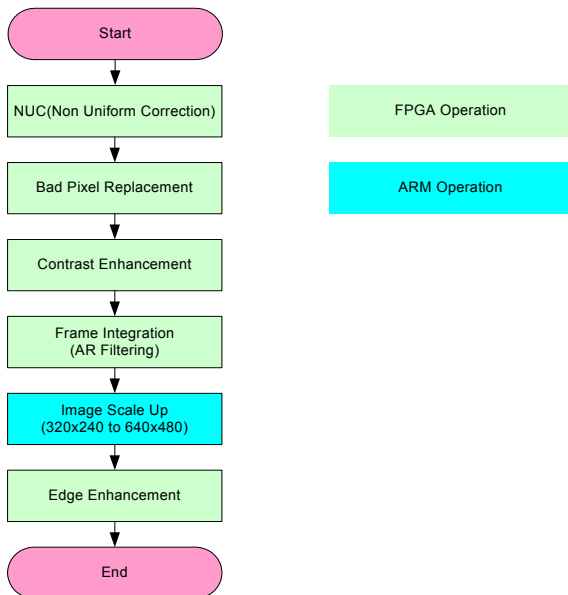
통합제어모듈은 검출기에서 출력되는 2가지 온도출력을 모니터링하여 TEC 제어보드의 DAC로 I<sup>2</sup>C 통신을 이용해서 TEC 설정 온도를 가변적으로 조정할

수 있는 구조로 설계하였다.

또한 통합제어모듈은 FPGA와 ARM 프로세서를 유기적으로 활용하여 ASP 보드로부터 입력된 디지털 센서 출력을 이용해서 영상처리 알고리즘을 수행하고, 검출기 구동을 위한 구동 타이밍 신호와 바이어스를 생성한다. 검출기로 인가되는 구동 신호는 6Mhz의 Pixel Sync로 구동하여 초당 약 60장의 320×240 포맷 영상을 생성한다.

### 3. 열상처리 소프트웨어 설계

검출기의 영상출력은 ASP 보드를 거쳐 통합제어 모듈로 전송되어 영상신호처리 및 가시화 과정이 이루어진다. 열영상 신호처리는 검출기에서 출력된 신호의 가시화를 위한 보정 및 영상개선 과정으로 그림 5와 같은 단계로 이루어진다.



[그림 5] 열상처리 알고리즘 흐름도

#### 가. 불균일성 보정(Non-Uniformity Correction)

검출기에서 각 셀의 출력은 휘스톤브릿지 상의 미소한 불균형과 증폭단의 오프셋에 의해 동일한 배경에 대해서도 출력편차가 심하게 나타나게 되는데 이러한

현상을 해결하기 위한 과정이 불균일성 보정이다.<sup>[2]</sup> 본 논문에서는 검출기의 전압출력 레벨을 피드백에 의해서 1차적으로 보정하는 Coarse NUC와 디지털 신호처리를 이용하여 출력보상을 하는 Fine NUC로 구성된 2단계 보정기법을 적용하였다.

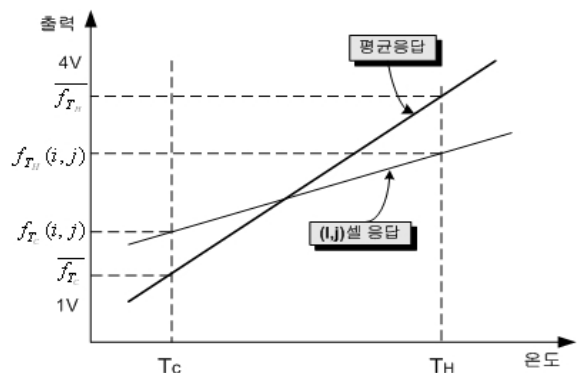
#### 1) Coarse NUC

BIRD 검출기는 검출기의 전압출력 레벨자체를 피드백에 의해서 1차적으로 보정할 수 있는 Coarse NUC를 지원한다. 검출기 출력단의 오프셋을 보정하여 동일온도를 가지는 물체에 대해 아날로그 출력이 목적전압(2.5V)의 100mV 이내 오차범위로 안정화될 수 있도록 제어한다.

#### 2) Fine NUC

BIRD 검출기의 아날로그 출력범위는 1V~4V이며, 이 구간의 출력특성은 선형성을 보장한다. 그러므로 2개의 기준점을 이용하는 2점 보정을 통해서 이득과 오프셋 계수로 출력보상이 가능하다.

그림 6에서와 같이 Cold Reference 온도( $T_C$ )와 Hot Reference 온도( $T_H$ )를 이용해서 입력온도에 대한 검출기 출력전압 사이의 대응관계를 구하고, 각 셀의 출력특성이 평균응답 그래프의 기울기와 절편을 가지도록, 각 셀별로 이득과 오프셋을 보정한다.



[그림 6] 온도별 셀 응답특성

검출기  $(i, j)$  셀의 출력을  $f(i, j)$  라고 하면 보정된 검출기 출력  $f'(i, j)$ 는 이득,  $G(i, j)$ 와 오프셋,  $O(i, j)$ 에 의해서 식 (1)과 같이 표현된다.

$$f'(i,j) = f(i,j)G(i,j) + O(i,j) \quad (1)$$

이득과 읍셋을 구하는 과정은 먼저 Cold 와 Hot Reference의 균일한 온도를 가지는 배경을 이용하여 획득한 N×M 디지털 영상으로부터 공간영역 밝기 값의 평균  $\overline{f_{T_C}}$ ,  $\overline{f_{T_H}}$ 를 구한다.

$$\overline{f_{T_C}} = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{T_C}(i,j) \quad (2)$$

$$\overline{f_{T_H}} = \frac{1}{NM} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} f_{T_H}(i,j) \quad (3)$$

각 셀의 반응특성은 출력구간에서 선형성을 가지므로, 식 (4, 5)와 같이 셀의 이득은 셀 평균이득과 개별 셀의 이득비로서 구할 수 있으며, 읍셋은  $T_C$ 에서의 이득으로 보정된 값과  $T_C$ 에서 셀의 평균값의 차를 구할 수 있다.

$$G(i,j) = \frac{\overline{f_{T_H}} - \overline{f_{T_C}}}{f_{T_H}(i,j) - \overline{f_{T_C}}(i,j)} \quad (4)$$

$$O(i,j) = \overline{f_{T_C}} - G(i,j)f_{T_C}(i,j) \quad (5)$$

이득과 읍셋 값은 최초 시스템 조립 시에 흑체를 이용해서 추출된 값이 통합제어모듈의 메모리에 저장된다.

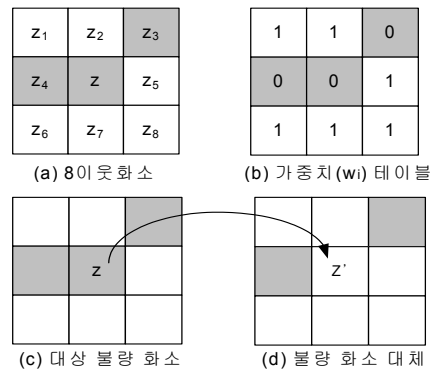
읍셋 보정은 사용자에게 의해 비주기적으로 수행 가능토록 설계되었으며, 보정명령을 받게 되면 통합제어모듈은 보정 셔터를 닫고, 셔터면을 바라본 영상을 획득하여, 모든 셀의 출력이 동일하도록 식 (5)와 같이 보정하고, 메모리 상의 읍셋 테이블을 갱신한다.

#### 나. 불량화소 대체

불량화소는 최초 각 셀의 이득과 읍셋 값을 추출하는 과정에서 검출기 2D 셀의 평균 이득과 편차가 많이 발생하는 셀로 정의하고, 해당 위치 셀의 A/D 데이터에서 MSB를 '1'로 설정하여 플래그를 표시한다. 불량화소 대체 연산은 매 프레임 불균일성 보정을 수

행한 후의 데이터에서 Bad 플래그가 되어 있는 화소 값을 3×3 마스크 연산을 이용해서 구해진 8이웃 화소의 평균값으로 화소값을 대체하게 된다. 만약 이때 플래그된 화소의 이웃화소 중 불량화소가 존재한다면 그 화소는 연산에서 제외하게 된다.

그림 7은 이웃화소에 회색으로 표시된 2개의 플래그된 불량화소가 존재하는 예를 나타낸다. 현재 3×3 창에서 가운데 플래그된 화소값, z의 대체를 위해서 주변의 플래그 되지 않은 6개의 화소를 이용하게 된다. 일반적인 화소의 대체값 계산은 아래 그림과 식 (6)에 의해서 수행된다.



[그림 7] 불량화소 대체 과정

$$z' = \frac{1}{8 - N_B} \sum_{i=1}^8 z_i w_i \quad (6)$$

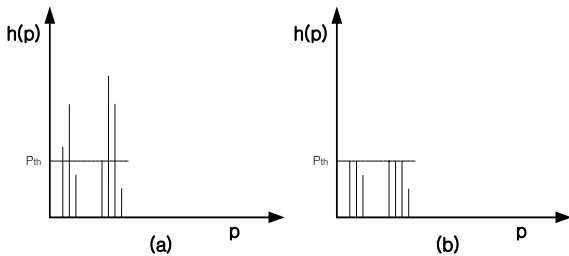
이 때,  $N_B$ 는 z 주변의 불량화소 개수를 나타낸다.

다. 대조비 향상(CEM : Contrast Enhancement) 열상(Thermal Image)은 낮은 대조비를 가지므로 대조비 향상 처리를 별도로 하지 않으면 가시화가 불가능하다. 대조비 향상 기법의 하나인 평탄평활화(Plateau Equalization)는 일반적인 히스토그램 평활화 기법의 단점을 극복하기 위해서 제안되었다.<sup>[3]</sup>

히스토그램 평활화 기법은 히스토그램의 누적 값이 가중치로 작용하여 높은 히스토그램의 누적 값을 갖는 픽셀에 대해 변환된 새로운 히스토그램에서 값의 분포 간격이 넓어지고 작은 값을 갖는 부분은 서로 모여 조밀하게 되어 세밀한 정보를 상실하게 된다.

이러한 단점을 보완하기 위하여 식 (7)과 같이 히스토그램의 크기에 제한을 주어 히스토그램에 의한 변환함수를 직접적으로 조절하여 대조비를 조절할 수 있다.

이 과정은 입력영상에서 획득한 히스토그램을 이전 히스토그램 데이터와 AR(Auto-Regressive) 필터링 한 후 누적분포함수(CDF : Cumulative Distribution Function)를 구하는 과정에서 히스토그램 테이블이 가질 수 있는 최대 픽셀 개수를 그림 8 및 식 (7)과 같이 제한한 히스토그램을 이용하여 평활화를 수행한다.



[그림 8] 평탄평활화에서의 픽셀 개수 제한  
(a) 원영상의 히스토그램  
(b) 임계값  $P_{th}$ 에 의해 제한된 히스토그램

$$h_{plot}(p) = \begin{cases} h(p), & \text{if } h(p) < P_{th} \\ P_{th}, & \text{else} \end{cases} \quad (7)$$

평탄평활화의 효과는 거의 동일한 배경 화면상에 작은 영역을 점유하는 특정 대상의 영상에 적합한 대조비 개선 알고리즘이다. 그러므로 대부분의 누적함수 영역을 형성하는 배경 화소들의 영향을 제한한다. 평탄화 제한 값이 1인 경우는 히스토그램 펼침 또는 투영의 효과를 갖으며 영상의 최대 히스토그램 값 이상인 경우 일반적인 히스토그램 평활화와 동일하다. 일반적으로 평탄화 제한 값은 영상의 상태와 동적 범위에 의존한다.

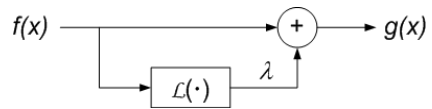
라. 프레임 AR(Auto Regressive) 필터링

영상의 잡음을 감소시키고 프레임간의 밝기 값의 변화가 크게 발생하는 것을 보정해주기 위해서 이전 프레임의 화소 값을 이용해서 현재 프레임의 화소 값을 보정하는 과정을 거친다.

$$F'_x(i,j) = \alpha F_x(i,j) + (1-\alpha)F_{x-1}(i,j) \quad (8)$$

마. 경계선 강조

일반적으로 영상의 선명도를 향상시키기 위하여 원 영상에 원 영상의 고주파 성분과 성분을 추출하여 그림 9와 같이 가중합을 취하게 된다.



[그림 9] 경계선 강조 블럭도

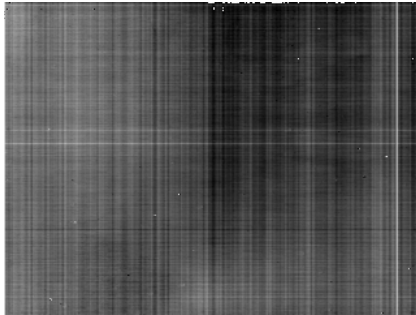
위의 블럭도에서  $f(x)$ 는 원 영상,  $g(x)$ 는 선명도가 향상된 영상을 나타내며,  $L(\cdot)$ 는 영상의 고주파성분을 추출하는 연산자이고,  $\lambda$ 는 가중치를 나타낸 것이다. 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$g(x) = f(x) + \lambda \cdot \mathcal{L}(f(x)) \quad (9)$$

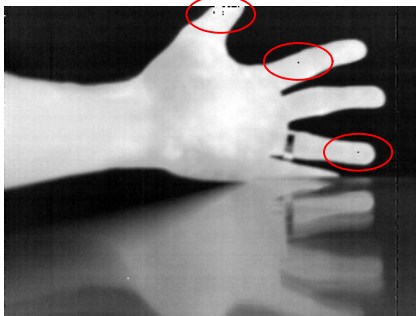
영상의 고주파성분을 추출하기 위해서 Sobel, Prewitt 등 다양한 필터의 적용이 가능하며, 본 논문에서는 실시간 구현이 가능하며, 상하좌우의 모서리 성분을 반영할 수 있는 라플라시안 필터<sup>[4]</sup>를 사용하였다.

4. 실험결과

실험 영상은 2장에서 소개된 방법으로 설계된 하드웨어를 이용해서 획득하였으며, 영상처리 알고리즘을 통한 단계별 처리결과 영상을 그림 10에 나타내었다. 그림 10(a)는 검출기 14bit 출력을 화면에 표시하기 위해서 8bit로 선형 매핑한 영상으로 세로줄과 가로줄 형태의 불균일성이 존재함을 보여준다. 그림 10(b)는 NUC 과정을 통해서 불균일성을 보정한 후 CEM을 이용해서 대조비를 개선한 후의 영상이다. 그림 10(c)는 불량화소를 대체한 후 불균일성 보정 및 대조비 향상 처리를 한 영상으로 그림 10(b)에서의 손가락 부위 및 영상의 오른쪽 부분에서 세로줄 형태의 불량화소들이 제거되었음을 알 수 있다. 그림 10(d)



(a) 검출기 출력 영상



(b) 불균일성 보정 및 대조비 개선 영상



(c) 불량화소 대체 후 영상



(d) 경계선 강조 처리 영상

[그림 10] 실험결과 영상

는 제안한 경계선 강조 처리 과정을 거친 후의 결과 영상으로 그림 10(c)와 비교하여 배경과의 경계부분이 뚜렷해짐을 알 수 있다.

## 5. 맺음말

본 논문에서는 복합형 소총의 사격통제장치에 적용된 소형, 저전력 열상발생모듈 설계에 대한 내용을 소개하였다. 제한된 광학계 제원과 전력으로 최적의 성능을 구현하기 위해 적응형 온도 제어 알고리즘을 적용한 TEC 제어와 2단계 NUC, AR 필터링, 평탄 평활화, 경계선 향상 기법 등을 적용한 열상처리 알고리즘을 제안하였다. 열상발생모듈을 이용한 실험결과 영상을 통하여 신호 대 잡음비의 개선과 시인성 확보를 입증하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] 홍석민, 송인섭, “열상장비 개요”, 물리학과 첨단기술, 1998.3.
- [2] M. Schulz and L. Caldwell, “Nonuniformity correction and correctability of infrared focal arrays”, Proc. SPIE, Vol. 2470, pp. 200~211, 1995.
- [3] V. E. Vickers, “Plateau equalization algorithm for real-time display of high-quality infrared imagery”, Opt. Eng., Vol. 35, No. 7, pp. 1921~1926, July 1996.
- [4] R. C. Gonzalez and R. E. Woods, Digital image processing, 2nd ed., Prentice Hall, pp. 131~134, 2002.