

# 초점면 배열 방식의 열상카메라 시스템의 구현

## Implementation of a Thermal Imaging System with Focal Plane Array Typed Sensor

박 세 화, 원 동 혁, 오 세 중, 윤 대 섭  
(Se-Hwa Park, Dong-Hyuk Won, Sejung Oh, and Dae-Seop Yoon)

**Abstract** : A thermal imaging system is implemented for the measurement and the analysis of the thermal distribution of the target objects. The main part of the system is a thermal camera in which a focal plane array typed sensor is introduced. The sensor detects the mid-range infrared spectrum of target objects and then it outputs a generic video signal which should be processed to form a frame thermal image. Here, a digital signal processor(DSP) is applied for the high speed processing of the sensor signals. The DSP controls analog-to-digital converter, performs correction algorithms and outputs the frame thermal data to frame buffers. With the frame buffers can be generated a NTSC signal and transferred the frame data to personal computer(PC) for the analysis and a monitoring of the thermal scenes. By performing the signal processing functions in the DSP the overall system achieves a simple configuration. Several experimental results indicate the performance of the overall system.

**Keywords** : thermal imaging, digital signal processor, thermal vision system, focal plane array, infrared sensor

### I. 서론

모든 생물이든 무생물이든 절대온도 0도 (-273 ℃) 이상에서는 복사에너지를 방출하고 있으며, 이 에너지는 공기, 가스, 액체, 고체 등의 물리적 전달체를 통하여 전파된다. 따라서, 외부 광원이 전혀 없는 야간에도 물체 자체가 발하는 복사에너지를 측정할 수 있으면, 그 물체의 모양이나 움직임을 손쉽게 파악할 수 있다. 이렇게 물체에서 내는 복사에너지는 가시광선의 스펙트럼 영역과는 거의 독립적인 적외선 영역에 존재함으로써 사람의 눈에는 보이지 않으며, 온도의 차이로 인해 주변과 구별이 된다. 이와 같이 적외선 영역에 속함으로써 사람의 눈으로 볼 수 없는 물체의 온도분포를 적절한 변환을 통해 가시화하여 쉽게 인식할 수 있도록 만들어 주는 장비를 보통 넓은 의미에서 열상 장비(thermal imaging system) 또는 열상 카메라 시스템이라고 한다[1,2]. 이러한 열상 장비의 기본 구성에 대한 형태는 그림 1과 같으며, 적외선 렌즈로 구성된 광학부, 적외선 검출기, 검출기에서 발생된 신호를 영상 신호에 적합하도록 처리하는 취득(readout) 회로, 센서 처리부 및 열상 가시화부 등으로 이루어진다. 일반적으로 검출기와 취득회로는 각기 다른 기관에 제작된 후 하이브리드 본딩을 통하여 단일 모듈형태로 제작되어 열상 센서 유닛을 이룬다. 열상 장비에의 활용을 위하여 열상 검지용 취득(readout) 집적회로에 대한 연구도 국내에서 보고되고 있다[3].

과거에는 한 점에 대한 온도 특성을 측정할 수 있는 적외선 센서와 액체 냉각 방식의 냉각기 및 복잡한 광학계로 이루어진 구조의 열상 장비가 주로 개발되었다. 최근에는 1차원의 적외선 센서 또는 2차원의 초점면 배열(focal plane array) 센서가 채택 적용되고 있으며[4,5], 센서의 냉각 부분도 반도체의 전기적 특성을 이용하며 소형화되어 가는 추세이다. 그러나 열상 장비는 그 응용 분야가 주로 국방과 밀접하므로 연구결과를 접하기가 어려운 실정이다.

본 논문에서는 열상 장비의 개발을 위해 초점면 배열 열상 센서를 이용하며, 여기서 발생하는 신호를 적절히 처리하여 열상 분석이 가능한 열상 장비의 구현 사례를 다루고자 한다. 그리고, 본 논문의 부분적인 내용은 [6,7]에 보고되어 있으나 부족한 내용이 많으므로, 여기에서 구현 내용을 좀 더 기술하고자 한다.

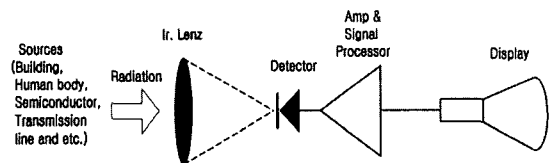


그림 1. 열상 시스템.  
Fig. 1. Thermal imaging system.

### II. 연구 동향 및 이론적 배경

#### 1. 적외선 센서 방식

파장의 영역에 따른 대역 구분은 그림 2에서 볼 수 있다. 가시광선 영역 보다 짧은 파장대역은 자외선 영역이며, 긴 파장 대역이 적외선 영역이다. 가시광선 영역과 가까운 적외선 영역은 약간의 불빛이 있는 경우 기존 CCD 카메라용 센서 자체의 스펙트럼 대역이 확장되어 물체에 대한 감지가 가능한 경우도 있으나, 미약한 빛이라도 필요하다. 하지

접수일자 : 1999. 10. 19., 수정완료 : 2000. 2. 2.  
박세화 : 한국생산기술연구원 생활산업기술개발센터  
원동혁 : (주) 범미유니버스 대표  
오세중 : (주) 미키 인터내셔널 부설연구소  
윤대섭 : (주) 범미유니버스 연구원

※본 연구는 공업기술기반 개발사업인 “온도 분포 계측 및 분석을 위한 열상 장비의 개발”과제와 생산기술개발 사업인 “열상센서 신호처리기술 개발”과제의 연구결과의 일부를 수록한 것입니다.

만, 파장이 약간 더 긴 적외선 영역의 감지 소자는 외부의 빛이 전혀 없더라도 물체 자체에서 내는 이 대역의 복사에 에너지를 감지하여 물체를 인지 할 수 있다. 적외선 영역 중 중파장 적외선(MWIR, 3 ~ 5 μm)과 장파장 적외선(LWIR, 8 ~ 14 μm) 대역의 파장대가 대기 투과 특성이 우수하다. 이런 대역의 검출 소자는 열형과 양자형으로 구분되는 데, 양자형은 열잡음에 민감하므로 냉각기가 요구되지만 감도가 아주 우수하다. 양자형 소자는 균일한 신호를 얻어내기 위해 검출기를 냉각시켜 저온에서 동작시키는데, 대표적으로 PtSi, InSb 그리고 HgCdTe 검출소자가 활용되고 있다. 여기서, PtSi는 반도체 집적화 기술에 힘입어 고집적화가 가능한 반면 양자 효율이 아주 낮아 감도가 다른 소자보다 떨어진다. HgCdTe는 LWIR 영역의 파장대 복사에너지를 감지하기에 거의 100% 대기투과 특성을 가지고 있으므로 원거리 물체에 대한 감지에 활용될 수 있으나 상당히 고가이다. InSb로 이루어진 센서는 MWIR 영역에 해당되며, 감도도 상당히 우수하다[8].

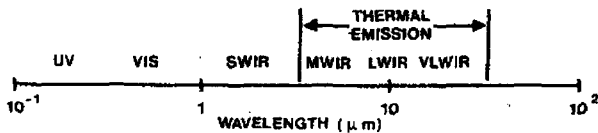


그림 2. 적외선 파장 대역.  
Fig. 2. Spectrum of infrared wave.

이런 검출 소자로부터 열상을 얻는 방식에는 그림 3에서 볼 수 있듯이 라인 스캐닝 방식에 의한 것과 초점면 배열 방(focal plane array) 또는 스타링(starring) 방식이 있다. 라인 스캐닝 방식은 한 라인 또는 몇 개의 라인 형태로 검출 소자를 배열하여 신호를 얻어내는 것으로 한 개발 사례를 [9]에서 볼 수 있다. 이런 방식의 센서는 열상의 프레임에서 라인 수를 목적에 맞게 늘리거나 줄임으로써 해상도의 조정이 가능하지만 정밀한 광학 메카니즘과 신호처리가 요구된다. 초점면 배열 방식은 프레임의 해상도가 고정되어 있으며, 각 픽셀이 2차원 배열로 결정된 위치를 가지고 있다. 각 픽셀이 외부로 신호를 출력할 시에는 각 픽셀에서 모아진 복사에너지를 취득(readout)회로에서 전기신호로 변환, 증폭하여 출력시킴으로써 영상신호를 발생시켜 준다. 이 때, 광학부에 적외선 렌즈를 부착하고, 센서 유닛과 접속하여 비디오 신호를 입력받아 처리하면 열상 프레임을 구성할 수 있어서 열상 시스템의 구조가 아주 단순해질 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 이러한 방식의 센서를 채택한 열상 시스템의 구현 경험을 다루고자 한다.

2. 열상 구성의 기본 원리

모든 물체는 절대 온도 0도 이상에서 전자기적 복사(radiation)를 한다. 이런 단위 파장당 복사의 최대값은 (1)의 플랑크(Planck)의 흑체 복사 법칙(blackbody radiation law)으로 주어진다.

$$M_e(\lambda, T) = \left( \frac{2\pi^5 hc^2}{15} \right) \left[ \exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1 \right]^{-1} \text{ [W m}^{-3}] \quad (1)$$

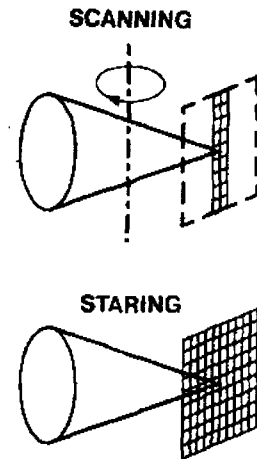


그림 3. 적외선 센싱 방식.  
Fig. 3. Infrared sensing alternatives.

여기서,

- c : 빛의 속도
- h : Planck 상수 = 6.626 x 10<sup>-34</sup> J s
- k : Boltzmann 상수 = 1.381 x 10<sup>-23</sup> J K<sup>-1</sup>
- T : 절대온도(Kelvin)
- λ : Radiation wavelength in meter.

이런 관계를 그림 4에 나타내었다. 실제 물체의 복사는 흑체복사 항에 스펙트럼 에미시비티(emissivity) ε(λ)를 곱해야 한다.

$$[M_e(\lambda, T)]_{actual} = \epsilon(\lambda, T)M_e(\lambda, T) \quad (2)$$

양자(photon)당 에너지는  $\frac{hc}{\lambda}$  이므로, 양자 플럭스(photon flux)에 의해 플랑크의 법칙은 다음과 같이 기술될 수 있다.

$$M_e(\lambda, T) = \left( \frac{\lambda}{hc} \right) M_e(\lambda, T) \text{ [photons s}^{-1} \text{ m}^{-3}] \quad (3)$$

복사되는 전체의 파워는 (1)을 모든 파장에 대해 적분함으로써 주어지며 이는 (4)와 같이 나타내진다.

$$M_e(T) = \sigma T^4 \text{ [W m}^{-2}] \quad (4)$$

여기서 σ는 볼츠만(Boltzman) 상수(5.67 x 10<sup>-8</sup> W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>)이다.

300 K에서 1 M<sup>2</sup>의 면적을 가진 흑체가 내는 전체의 파워는 약 460 W이며, 이런 물체의 온도에 대한 변화율은

$$\frac{\delta M_e}{\delta T} = 4\sigma T^3 \quad (5)$$

이다. 이는 300 K에서 약 6 W m<sup>-2</sup> K<sup>-1</sup>에 해당된다. 유리, 나무, 도로 등으로 이루어진 보통의 물체로부터 나오는 복사에너지를 계측하는 경우 각 픽셀마다 온도와 에미시비티(emissivity)의 변동에 의해 열상과 관련된 신호가 변화됨을 볼 수 있다. 따라서 열상을 구성하는 경우에 유용한 신호는 이런 복사에너지의 변화이다.

그러므로, 열상의 기본 원리는 복사에너지의 변동을 검

출하여 적외선 화면(scene)의 실제 영상을 구현하는 것이다.

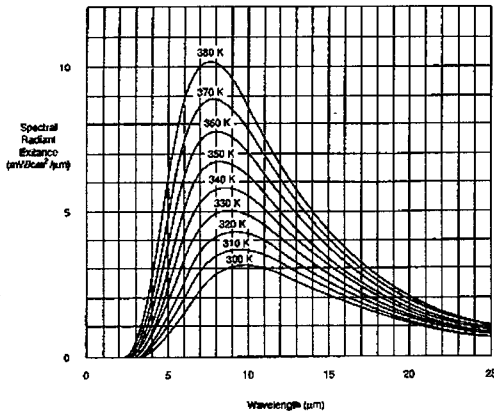


그림 4. 파장과 복사에너지와의 관계.  
Fig. 4. Spectral radiant exitance versus wavelength.

3. 열상 센서로부터의 취득 신호 모델

(5)에서 언급된 바와 같이 복사에너지의 변동을 검출하여 열상 신호를 형성하게 되는데, Mooney는 적외선 센서의 선형 모델을 개발하였다. Mooney의 선형 모델은 초점면 배열 센서가 스펙트럼이 비균일하고, 더해지거나 곱해지는 형태의 광 응답성을 가진다고 보았으며, 여기서도 그런 형태의 과정이 관계된다고 가정하였다. Perry는 Mooney의 센서 모델을 바탕으로 하여 비균질성 교정에 대한 분석을 하기도 했는데[10], Mooney의 모델은 기본적으로 열상 센서의 신호 응답 특성을 이해하는 데 도움을 주므로 본 논문에서 다시 언급한다.

$N_{ij}(T_{ij})$ 로 표현되는 출력은 픽셀  $(i, j)$ 에 대한 전자수를 나타낸다고 하면, 방출과 탐지의 확률적인 과정으로서의 센서의 신호는 시간적인 의미에서의 연속적인 기대값의 신호량으로 볼 수 있다. 픽셀  $(i, j)$ 에 대한 출력 값은 아래와 같다.

$$N_{ij}(T_{ij}) = \left[ \tau_{eff} t_{int} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_{ij}) \eta_{ij}(\lambda) d\lambda \right] A_{ij} \Omega_{ij} + D_{ij} \quad (6)$$

$$\Omega_{ij} = \left[ \frac{\pi \cos^4 \theta_{ij}}{4(F/\#)^2 + 1} \right] \quad (7)$$

여기서,

$L(\lambda, T_{ij})$  : 셀  $(i, j)$ 로부터,  $T_{ij}$ 의 온도에서 오는 스펙트럼 양자 복사(spectral photon radiance)

$F/\#$  : 광학부의 구경과 초점 거리 비율

$\tau_{eff}$  : 광학부의 유효 전달율

$\lambda_1$  : 광학부의 상위 컷오프(cutoff) 파장

$\lambda_2$  : 광학부의 하위 컷오프(cutoff) 파장

$\Omega_{ij}$  : Projected solid angle subtended by the exit pupil of the optical system, as viewed from focal plane array

$\theta_{ij}$  : Off-axis angle of pixel  $(i, j)$ , as seen from the exit pupil

$D_{ij}$  : Dark charge per integration time at pixel  $(i, j)$

$A_{ij}$  : 픽셀  $(i, j)$ 의 면적

$\eta_{ij}(\lambda)$  : 픽셀  $(i, j)$ 의 파장에 대한 양자 효율

$t_{int}$  : 광학적인 인테그레이션 시간(광자 축적 시간)

이런 센서의 출력 신호와 관련된 파라미터는 실제로 알기가 매우 어려우며, 일반적으로 취득 회로를 거치면서 증폭되어 출력되므로 상관관계를 파악하기가 용이치 않아 위의 관계식을 그대로 열상 카메라 시스템의 해석에 활용할 수가 없다. 하지만,  $t_{int}$ 의 변화가 출력의 변화에 선형적으로 관계되는 것을 관찰할 수 있기에 열상 시스템의 구현 시에  $t_{int}$ 를 조정함으로써 각 픽셀에 대한 출력 값의 변화를 얻어낼 수가 있으며, 이를 열상의 생성에서 튜닝 파라미터로 활용하고자 한다.

III. 시스템의 구성 및 기능

1. 열상 센서의 인터페이스 요건

전술한 바와 같이 보통 열상 센서는 검출기와 취득회로가 일체가 되어 단일 모듈형태로 공급된다. 본 논문에서 구현할 열상 카메라 시스템을 위한 초점면 배열 형태의 열상 센서는 중파장 적외선(3 ~ 5  $\mu m$ )의 스펙트럼에 해당되며, InSb 검출소자로 이루어진 최대 320 x 256의 픽셀을 가진 센서이다.

이런 센서와 인터페이스하기 위해서는 기본적으로 다음과 같은 다섯 개의 디지털 신호를 인가해 주어야 한다.

- 두개의 위상 클럭(phase clock), PH1과 PH2
- 인테그레이트 클럭(integrate clock)
- 두개의 통신 신호(communication signal), COM1와 COML

PH1과 PH2는 동일 주기에 위상만 180° 차이가 나며, COML과 COM1는 위상 클럭에 동기되어 센서로부터 원하는 신호를 얻기 위해 발생시켜 주어야 할 통신 신호이다. 이런 통신 신호를 통해 기본적인 센서의 인터페이스 파라미터(예로 검출기의 전류 한계 값 조정이나 해상도의 변경 등)를 설정하게 된다. 그리고 양자의 축적을 위한 신호가 인가되는데 이는 (6)의  $t_{int}$ 와 관계되어 그 인가 시간의 조정으로 출력 신호의 레벨 조정이 이루어진다. 즉 대체로 온도가 낮은 물체는 양자를 많이 축적하여야 동작 범위 내의 전압을 얻을 수 있으므로 그 신호의 상승 시간을 길게 주어야 하며, 온도가 높은 물체에 대해서는 그 반대로 상승 시간을 짧게 하여야 양자 축적 신호의 포화가 일어나지 않는다.

위에서 언급한 신호들의 엄격한 타이밍 요건이 만족되면 센서유닛으로부터 0 ~ 5V의 비디오 출력 신호를 얻을 수 있다. 그림 5에서 볼 수 있듯이 각 픽셀의 비디오 출력 신호는 클럭 신호에 동기가 되어 출력되며 그 클럭의 상승 시점에서 해당 픽셀의 온도에 해당되는 신호 레벨 값을 보내준다. 즉, 그 출력 신호 레벨의 높낮이에 따라 온도차이 정도를 계측할 수 있다. 이 때, 위상 클럭 신호에 동기되어

발생되는 비디오 신호는 첫 픽셀부터 마지막 픽셀까지 순차적으로 공급되는 것이 아니고, 임의의 규격으로 이루어져 있어서 특별한 처리가 요구된다. 일례로, 대상으로 하는 열상 센서는 비디오 출력 신호를 출력함에 있어서 의미 없는 픽셀 신호를 출력하기도 하며, 한 라인 출력에서 짝수 픽셀과 홀수 픽셀이 교번 한다. 이렇게 출력하는 이유는 센서의 제작공정의 단순화와 관계되어 있다고 하겠다. 본 논문에서는 이런 신호를 효과적으로 처리하여 의미 있는 열상 프레임에 구성하고 사람이 인식할 수 있도록 표준 규격 신호를 만들어 주고자 한다.

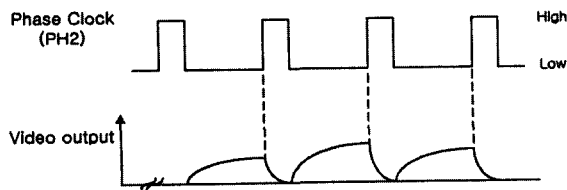


그림 5. 위상 클럭 신호와 비디오 신호와의 타이밍 관계.

Fig. 5. Timing relationship between phase clock and video signal

2. 열상 센서 신호의 주요 처리 과정

전술한 열상 센서와 인터페이스하여 한 프레임의 열상 데이터를 획득하기 위해서는 다음과 같은 처리 시간이 순차적으로 요구된다.

- ① 통신 신호 발생
- ② 광자 축적 시간( $t_{int}$ )
- ③ 위상 클럭 주기 × 총 픽셀수
- ④ 위상 클럭 주기 × 무의미한 픽셀수
- ⑤ 의미 있는 픽셀의 데이터 보정 및 프레임 데이터 구성
- ⑥ NTSC 인코딩용 프레임 버퍼에 데이터 전송
- ⑦ 디지털 신호 출력을 위한 프레임 데이터 전송

그림 6에 이러한 과정이 기술되어 있으며, 여기에 나타난 숫자는 위에서 언급한 순차적인 처리 시간을 의미한다.

①은 해상도의 변경이라든지 전류 제한치 조절을 위해 통신 데이터에 실어 매번 보내주기 위함이며, ②에서는 대상 물체에 대한 온도의 높고 낮음에 따라 광자 축적 시간을 조정하면서 같은 물체의 온도에서도 비디오 신호의 출력 레벨을 조정한다. ①에서 규정된 신호의 공급이 제대로 이루어지면 ③과 ④ 동안 열상 센서는 의미있는 픽셀 값과 그렇지 않은 픽셀 값을 위상 클럭 신호에 동기시켜 비디오 신호를 출력하게 된다.(실제적으로 ③과 ④는 복합되어 교번 하면서 이루어진다. 이들에 대한 관계 및 비디오 신호 출력 순서는 [6]에 나타나 있다) 이러한 출력 신호는 구현하는 시스템에서 A/D(Analog to Digital) 변환을 통해 취득되고 순서적으로 프레임 버퍼에 저장된다. 본 논문에서는 이런 과정을 소프트웨어적으로 처리하였다. 즉, 픽셀에 대한 비디오 신호의 출력 시점을 계속적으로 감시하고 있다가 비디오 신호가 출력됨을 의미하는 READOUT 신호가 HIGH로 되면 PH2에 동기 되어 A/D 변환데이터를 가

져다가 프레임 버퍼에 저장해놓는 것이다. 통신과 관련된 다섯 개의 신호와 READOUT 신호는 타이밍 규격에 맞도록 EPLD(Erasable and Programmable Logic Device)에 구현되어 있다. ⑤단계에서는 ③과 ④의 시간동안 취득되어 저장된 데이터를 재구성하고 보정 한 후 프레임 데이터를 구성하게 된다. 이 단계에서 처리되는 한 예는 취득된 신호의 이득이나 오프셋 보정과 잘못된 픽셀 값의 대체(replacement)를 들 수 있겠다. ⑥에서는 이렇게 구성된 열상 프레임 데이터의 가시화를 위해 NTSC 신호로 인코딩하기 위해 설정된 프레임 버퍼에 전송하는 작업이 수행되고, 마지막으로 ⑦에서는 PC에서 공급받아 열상 분석에 활용할 수 있도록 디지털 신호로 출력하는 기능을 위해 설정한 다른 프레임 버퍼에 전송하는 작업이 수행된다. 열상 장비의 응용에 따라서 ⑥이나 ⑦의 모든 기능이 요구되지 않기도 하지만 나머지 과정은 반드시 필요하다.

이런 일련의 과정 중에서 열상 프레임 구성을 위해 가장 많은 연산이 요구되는 것이 ③과 ⑤이다. ③의 단계는 위상 클럭의 주기가 짧으면 짧을수록 이 단계에서 소요되는 시간이 줄어들 수 있으나, A/D 변환 시간과도 관계되고 센서의 접속 형식과도 연관되어 위상 클럭의 주기를 줄이는데 한계가 있다. 본 연구에서는 ③의 시간 동안 프로세서가 PH2 신호를 폴링(polling)하는 형태로 처리하였지만, 이를 프로세서의 개입없이 디지털 로직으로 병렬 처리한다면 전체적인 시간을 더욱 줄일 수 있다. 하지만, ⑤의 단계는 순수하게 소프트웨어로 처리되는 시간이므로 프로세서의 연산 속도에 따라 처리 시간의 단축이 이루어질 수 있다.

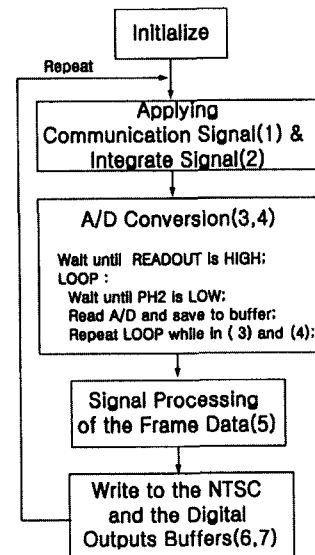


그림 6. 주요 신호 처리 흐름도.

Fig. 6. Flowchart of primary signal processes.

3. 시스템 구성

열상 센서와의 인터페이스를 위해서 아날로그와 디지털 회로가 복합된 전자 회로가 요구되며, III.2절에서 볼 수 있듯이 여러 단계의 처리 과정이 요구된다. 특히 열상 프레

임 구성 시간을 줄이기 위해서는 고속의 디지털 신호 처리가 많이 요구되므로 최근 이런 분야에 많이 적용되고 있는 DSP(Digital Signal Processor)를 채택 응용하였다. 본 연구에서는 이를 위해 TI사의 TMS320C31(50MHz)[11]이 활용되었는데, 이는 32비트 프로세서로써 자체에 부동소수점 연산기가 있어서 고속으로 실수 연산이 가능하다. DSP에서 A/D 변환기를 통해 수치화된 데이터를 적절히 처리하여 열상 프레임을 구성하고 이를 NTSC 신호로 변환하는 기능도 요구되며, PC에서 열상 프레임 데이터를 입력받기 위한 인터페이스 기능도 일반적으로 필요하다. 이런 기능을 모두 갖추기 위해 그림 7과 같이 전체시스템을 구현하였다([6,7] 참조). 열상 센서의 적외선 검출기는 광전형(photon effects)이므로 냉각기가 요구되는데, 검출기, 칩드회로와 냉각기가 일체형으로 구성되어 있다. 이런 열상 센서는 A/D 변환(10MHz)과 신호 조절기능을 갖춘 아날로그 신호 처리 보드가 접속되며, 이를 통해 수치화된 데이터는 디지털신호 처리 보드에서 DSP의 제어로 열상 프레임 데이터를 형성한다. 아날로그 신호 처리 보드는 센서와 직접 인터페이스되며, 센서에서 요구하는 여러 종류의 전원을 생성해 주기도 한다. 디지털 신호 처리 보드는 DSP, EPLD, 32비트의 메모리(512K SRAM, 128K EEPROM, 512K Flash Memory, 256K Field memory 2 pair), NTSC 인코더(KS0119) 및 디지털 I/O(input/output) 포트 등이 구현되어 있다. 여기서, 센서와의 통신을 위한 부분과 센서의 비디오 출력 시기 조절 기능을 EPLD에 하드웨어적으로 구현하였다. 시스템에서 출력하는 NTSC 신호는 일반 TV 모니터를 통해 가시화된 열상을 볼 수 있으며, 디지털 출력 신호는 PC에서 버스 인터페이스 카드를 통해 입력받을 수 있다. PC에서 열상 프레임 데이터를 입력받게 되면, 적절히 색깔을 입힌 후에 PC의 모니터에 생성시킬 수 있으며, 일반적인 여러 영상 처리 기법이 적용되어 분석 처리한 후에 인쇄할 수도 있다. 이런 일련의 과정을 모두 독자적으로 구현하여 대상 물체의 열상을 얻어 내었다.

열상 프레임 데이터로부터 픽셀 값의 차이에 따른 색깔 구분이 요구되는 데, NTSC 인코딩을 위한 프레임 버퍼 구성시에 교정된 픽셀 데이터로부터 특정한 색깔 혹은 휘도 값과의 관계는 (8)을 적용하여 구현하였다.

$$V(i,j) = \frac{K}{MAX\_SPAN - MIN\_SPAN} (\hat{\lambda}(i,j) - MIN\_SPAN) \quad (8)$$

여기서,

$i$  : 수평해상도에 해당되는 픽셀의 공간적 위치( $0 \leq i \leq$  최대수평해상도)

$j$  : 수직해상도에 해당되는 픽셀의 공간적 위치( $0 \leq j \leq$  최대수직해상도)

$V(i,j)$ : 가시화를 위한 교정된 데이터 값

$K$  : 팔레트 테이블의 색구분 개수

$\hat{\lambda}(i,j)$ : 픽셀  $(i,j)$ 에 대한 A/D 변환 값의 보정 후의 값

$MAX\_SPAN$  : 가시화를 위해 설정한 데이터의 최대

치  $0 < MAX\_SPAN \leq 2^N - 1$ ,  $N$ 은 A/D 변환기의 비트 수

$MIN\_SPAN$  : 가시화를 위해 설정한 데이터의 최소치  $0 \leq MIN\_SPAN < MAX\_SPAN$

따라서  $MAX\_SPAN$  또는  $MIN\_SPAN$ 을 조정함에 따라 같은 데이터 값이라도 다른 화면 출력 값을 나타내게 된다. 그 간격을 좁히면 좁은 데이터 구간을 가시화 시켜 주게 되며, 세밀하게 온도차이를 확인할 수 있다.  $K$ 는 팔레트의 색구분 개수로서 최대 256단계로 구분하여 적용하였다. 마찬가지로  $K$ 의 조정에 따라 온도 분해능의 조정이 가능하다. 즉, 동일 색깔로 표현되는 데이터의 범위가  $K$ 의 조정으로 설정된다.

그리고, PC인터페이스보드로 열상 카메라에서 RS-422 규격의 디지털 신호로 출력되는 열상 프레임을 입력하기 위해서 이중포트(Dual Port) 메모리가 적용되었으며, PC측의 소프트웨어의 단순화를 위해 두 개의 I/O 주소만을 이용하여 데이터를 입력받을 수 있도록 하드웨어적으로 구현하였다. 즉, 첫 번째 주소는 이중포트 메모리의 어드레스 포인터를 프레임 데이터의 초기로 보내도록 하는데 이용되고, 나머지 주소는 프레임 데이터를 하나씩 순차적으로 읽어들이는데 이용되어 PC측에서 데이터를 하나 읽어 가면 주소의 포인터가 하나 증가되고 다음의 데이터를 지시한다. 이런 방식으로 한 프레임 데이터를 모두 읽어 간 뒤 열상 분석 등의 작업을 마치고 앞의 과정의 반복을 통해 연속적으로 열상 프레임 데이터를 PC측에서 받아들일 수 있다.

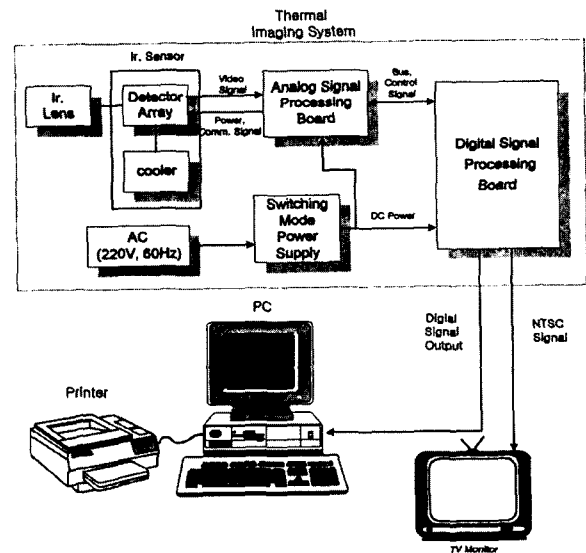


그림 7. 전체 시스템 구성도.  
Fig. 7. Configuration of the overall system.

IV. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 구현한 열상 카메라 시스템의 하드웨어를 그림 8에 나타내었다. 센서는 전기식 냉각기가 일체형으로 되어 있으며 소형이다. 센서 전반부에 적외선 렌즈를 부착하는 것만으로 광학부는 단순하게 구성된다. A/D 변환기

는 12비트이며 변환속도는 10MHz로서 0 ~ 5V의 입력 전압 범위내에서 0 ~ 4095까지의 데이터를 얻을 수 있다. 광자 축적 시간을 여러 가지로 바꾸어 본 후 상온에서 A/D 변환값이 2,000 근처가 되도록 고정한 다음 물체의 온도 변화에 따른 계측 특성을 보기 위해서 설정된 온도를 균일하게 유지하는 기기(black body infrared source)를 이용하여 5°C에서 45°C까지 1°C씩 변화시키면서 256 × 256의 해상도로 데이터를 구한 결과를 그림 9에 나타내었다. 이 경우 45°C 이상에서는 데이터가 최대치인 4095를 나타낸다. 그림 9에서 볼 수 있듯이 온도와 A/D변환 데이터와의 관계는 비선형성을 나타낸다. 이런 온도와 A/D 변환값과의 관계를 최소 자승법에 의해 1차식으로 근사한 경우와 2차로 근사하여 교정된 데이터가 그림 9에 함께 나타나 있다. 플랑크의 복사 법칙에 의하면 복사에너지는 온도의 네제곱에 비례하지만, 그림 9에서 볼 수 있듯이 좁은 온도 구간에서는 이를 2차의 근사식으로 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

구현한 열상 카메라 시스템의 성능 분석을 위해서 손쉽게 얻을 수 있는 인체의 열상을 대상으로 여러 경우에 대해서도 실험 결과를 얻었다. 그림 10은 인체의 안면에 대한 열상을 NTSC 모니터에 출력된 것을 보여 주는 것으로 256단계의 그레이로 출력된 신호로 이루어진 열상 화면과 16단계로 구분된 경우의 컬러 처리된 열상을 나타내고 있다. 그림 11은 다른 조건은 동일하고  $t_{int}$ 의 조정에 따른 열상 출력화면을 보여주고 있다. 광자 축적 시간의 14%정도 증가에 의해서도 열상의 픽셀 데이터가 전반적으로 확연하게 증가됨을 볼 수 있다. 따라서,  $t_{int}$ 의 조정으로 고온의 물체 또는 저온 물체에 대응하여 적절한 범위의 센서 출력값을 얻어낼 수 있다.

그리고, 열상을 자체적으로 구현한 PC 인터페이스 보드를 통해서 PC에서 입력 받아 임의로 지정한 위치의 데이터 값과 열상 프레임 화면을 실시간으로 모니터링하는 것을 그림 12(a)에 나타내었으며, 그림 12(b)는 열상 프레임 화면을 캡처한 화면의 후처리 결과를 나타낸 것으로 색깔을 여러 가지로 바꾸어 본 결과와 각 픽셀별 데이터 값 및 열상의 히스토그램 화면을 보여주고 있다. 이런 결과를 얻기 위해 프레임 데이터의 필터링, 각 픽셀에 대한 온도 데이터 분석, 인쇄, 국부의 온도 분포 해석 기능 등 다양한 열상의 후처리 기능이 구현된 Windows 환경 하에서 동작하는 객체지향구조의 소프트웨어를 개발하였다[12]. 여러 실험 결과를 통해서 구현된 열상 시스템의 성능을 분석하였는데, 구현된 시스템의 최소 분해 가능 온도값은 정확히 측정할 수는 없었으나 0.2°C 이내임을 확인할 수 있었다.

A/D 변환기의 해상도는 12비트이므로 실제적으로 30°C의 차이가 A/D 변환데이터로 보면 1,800 정도 됨을 보여주고 있으므로 이론적으로는 0.017°C의 온도 분해 능력을 보여줄 수 있다. 그러나, 실제적으로는 잡음이 개입되므로 그런 분해능의 달성은 불가능하다. 하지만 신호 처리 기법을 적절히 활용하면 최소 분해 가능 온도값을 아주 줄일 수 있으리라 기대한다. 하지만, 다양한 신호 처리 알고리즘을

적용하면 열상의 개선이 가능하나 한 프레임을 얻는 시간이 많이 소요될 수 있으므로 처리 시간과 초당 프레임 수와의 절충 관계가 성립된다. 따라서, 초당 많은 프레임의 처리가 요구되는 경우에는 디지털 신호 처리를 최소화하여 이에 소요되는 시간을 줄여야 하며, 반면에 적은 프레임도 무방한 경우에는 다양한 디지털 신호 처리 기법이 적용되어 열상을 향상시키는 부분을 강화할 수 있을 것이다.

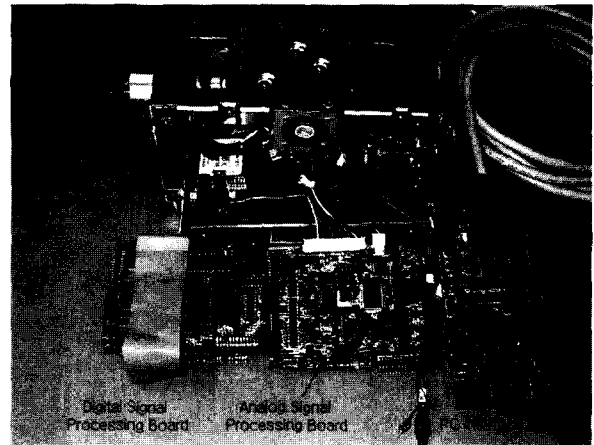


그림 8. 구현된 열상 카메라 시스템.  
Fig. 8. Implemented thermal imaging system.

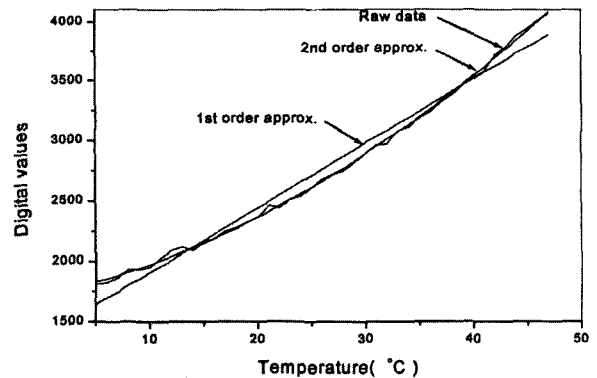


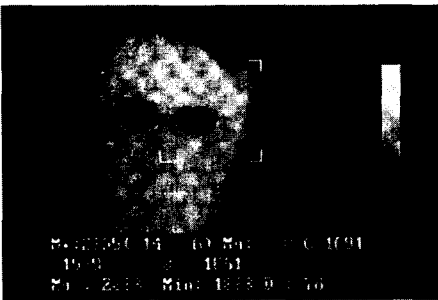
그림 9. 열상 시스템의 온도 계측 특성 및 근사화 곡선.  
Fig. 9. Measured temperature characteristics of the system and approximated curves

V. 결론 및 추후 연구과제

본 논문에서는 초점면 배열의 열상 센서를 적용하여 열상 장비의 구현 내용을 다루었다. 이런 열상 장비는 야간에도 물체의 움직임을 볼 수 있으므로, 군사적인 목적으로 주로 많이 이용되어 왔으며, 한편으로 환자의 몸에 이상이 있을 때 체열의 분포가 불균형을 이루게 되므로, 1차적인 의료 진단용[13]으로도 이용되고 있다. 또한, 건물의 단열 판정을 위한 용도로서도 이용[14]되기도 하고, 반도체 제



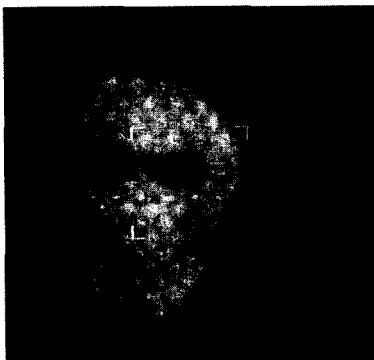
(a) 16 Colors



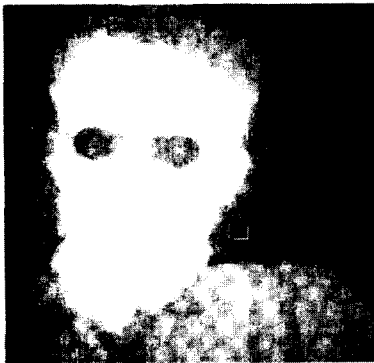
(b) Black and White

그림 10. NTSC 화면 출력.

Fig. 10. Monitored NTSC signal output.



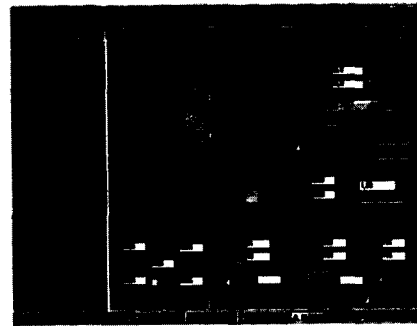
(a)  $t_{int} : 5.018msec$



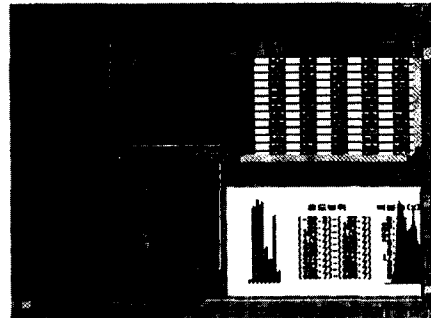
(b)  $t_{int} : 5.734msec$

그림 11. 인테그레이션 시간 조정에 따른 열상 출력 화면.

Fig. 11. Thermal imaging outputs related to integration time.



(a) 실시간 출력 화면(흑백)



(b) 열상 분석 화면

그림 12. PC에서의 열상 출력 및 분석 화면.

Fig. 12. Monitored and analyzed thermal imaging outputs in the PC.

조 공정 시에 부분적인 결함 발생 시 주변과 다른 온도분포를 나타냄을 검사하는 목적에도 적용될 수 있다.

본 논문에서는 초점면 배열의 열상 센서를 채택하여 열상 카메라 시스템의 구현 경험을 다루었으며, 대상으로 하는 열상 센서의 신호 처리를 위해 일부분을 EPLD에 디지털 로직으로 구현했을 뿐 열상 구성에 필요한 대부분의 기능을 DSP에서 소프트웨어적으로 처리하였다. 따라서, 전체적으로 시스템의 구조를 단순화할 수 있었으며, 여러 열상의 취득 예를 통해 구현된 시스템의 가능성을 보였다. 구현된 열상 시스템은 최소분해가능 온도차가 대략 0.2°C 이내이므로 저잡음 설계와 효과적인 디지털 신호 처리를 통해 이를 더욱 낮추는 연구가 필요하다. 또 많은 경우에 초당 프레임 수는 크게 중요하지는 않지만, 구현된 시스템은 대부분의 기능이 소프트웨어적으로 처리되기에 초당 프레임 수는 5프레임 밖에 안된다. 이는 부분적인 기능을 하드웨어화하여 병렬 처리를 하거나 보다 빠른 DSP를 적용함으로써 처리 속도를 높일 수 있을 것이다. 그리고, 비정상 픽셀 데이터의 고속 처리 방법, 비선형적인 센서 신호의 보정 방법 등 센서 신호 처리에 있어서의 다양하고 보다 효과적인 처리를 위한 연구와 실제적인 구현, 다양한 분야별 응용 연구 등은 추후 연구 과제로 남긴다.

열상 장비 관련하여서는 응용분야가 현재까지는 주로 국방과 관련되어 있으므로, 외국의 경우에도 기술적인 결과의 노출을 극히 제한하고 있어서 보고된 구현 사례에 대한 자료의 빈곤으로 시스템의 구현 시에 어려움이 많이 있

었다. 따라서, 향후에도 지속적인 연구가 요구되기는 하지만, 열상 장비의 구현 경험을 다룬 본 논문은 그 의미가 크다고 하겠다.

**참고문헌**

[1] 홍석민, 송인섭, "열상장비 개요", 물리학과 첨단기술, pp. 2-8, 3월, 1998.

[2] George J. Zisos, "Sources of radiation", *The Infrared & Electro-Optical Systems Handbook*, vol. 1, SPIE Press, 1993.

[3] 우회구의, "비냉각 열상장비용 64 x 64 IRFPA COMS Readout IC", 대한전자공학회 논문지, 제36권, C편, 제5호, pp. 335-345, 1999.

[4] 국방과학연구소, "초점면 배열 적외선 장비의 이해", 국방기술 정보, 1월, 1999.

[5] P. Helander, et al., "A 320 x 240 pixels quantum well infrared photodetector array for thermal imaging", *Physica Scripta*, vol. T79, pp. 138-142, 1999.

[6] 박세화, 원동혁, "열상 센서 신호 처리를 위한 DSP의 응용", 한국자동제어학술회의, pp. 1607-1609, 10월, 1998.

[7] 박세화, 원동혁, 오세중, 윤대섭, "초점면 배열 방식의 열상카메라 시스템의 구현", 한국자동제어학술회의, C-148~151, 10월, 1999.

[8] William L. Wolfe, *Introduction to Infrared System Design*, SPIE Optical Engineering Press, 1996.

[9] 송인섭, 유위경, 윤은숙, 이영철, 홍석민, "직병렬 주사 방식 열상장비의 신호처리기 설계 연구", 대한전자공학회논문지, 제31권 B편, 제1호, pp. 49-56, 1994.

[10] David L. Perry, "Linear theory of nonuniformity correction in platinum silicide focal plane arrays", *Proc. of SPIE*, vol. 1762, Infrared Tech. XVIII, pp. 60-69, Jan., 1993.

[11] *TMS320C3x User's Guide*, Texas Instruments, 1994.

[12] 산업자원부, "온도분포 계측 및 분석을 위한 열상장비의 개발", 공업기술기반사업보고서, 1999.

[13] 김영수, 조용은, 오성훈, "요추간판 탈출증 환자에서 컴퓨터 적외선 전신 체열 촬영의 의의", 대한신경외과학회논문지, 제19권, 제12호, pp. 1303-1313, 1990.

[14] 조성환, 태춘섭, "적외선 열상 측정기기", 공기조화냉동공학회논문지, 제21권, 제5호, pp. 357-363, 1992.



**박 세 화**

1965년 7월 23일생, 1984년 ~ 1988년 서울대학교 전기공학과(공학사). 1988년 ~ 1990년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사). 1990년 ~ 1995년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사). 1995년~현재 한국생산기술연구원 생활산업기술개발센터 선임연구원. 주관심 분야는 DSP 응용, 신뢰성 제어,  $H^\infty$  제어, 최진제어 기법의 산업 응용.



**원 동 혁**

1957년 8월 15일생. 1977년 ~ 1981년 연세대학교 식품공학과(공학사). 1982년 ~ 1983년 (주)진로 연구소. 1989년 ~ 1990년 재패무역. 1990년 ~ 현재 (주)범미유니버스 대표이사. 주관심 분야는 화상 분석 시스템, 적외선 카메라. 생물공학 관련 기기.



**오 세 중**

1970년 5월 1일생. 1998년 2월 서울시립대학교 제어계측공학과(공학사). 1998년 8월 ~ 2000년 1월 (주)범미유니버스. 2000년 2월 ~ 현재 (주)미키인터내셔널 부설연구소. 주관심 분야는 영상처리, 디지털 신호 처리. 센서 응용.



**윤 대 섭**

1971년 8월 12일생. 1990년 ~ 1996년 강원대학교 재료공학과(공학사). 1996년 8월 ~ 1997년 10월 (주)대기 품질관리부. 1998년 8월 ~ 현재 (주)범미유니버스. 주관심 분야는 열상 및 영상 신호 처리, 데이터 베이스 관리.