

관측용 열상장비의 개발

홍 석민*, 송 인섭, 김 창우, 김 현숙, 김 제기

국 방 과 학 연 구 소

Development of Thermal Imaging Observation System

S.M.Hong, I.S.Song, C.W.Kim, H.S.Kim, J.K.Kim

Agency for Defense Development

Abstract

This paper described the development of Thermal Imaging Observation System(TIOS) using the serial-parallel scan method. The detectors scan five lines at a time. These are put into serial order by electronic scan converter. Digital memory and high speed multiplexer are used for the serial conversion instead of charge coupled devices. As a result, thermal imaging system be presented with excellent performance which MRTD value is less than 0.5°K at 7.5 cycles/mm.

1. 서 론

절대온도 0도(0°K) 이상의 모든 물체는 고유의 복사에너지를 방출한다. 물체를 흑체(blackbody)로 가정하였을 때 물체가 방출하는 분광 복사 에미턴스(spectral radiant emittance)는 Planck의 법칙(Planck's blackbody radiation law)에 따라 물체가 지나는 절대온도의 함수로 표현될 수 있으며^{[1][2]} 상온(300°K 내외)에 존재하는 물체는 Wien의 변위법칙(displacement law)^[1]에 따라 약 10 μ m의 적외선 영역 파장대에서 최고의 복사 에미턴스를 방출한다. 이때 온도가 다른 물체는 관심 파장 영역에서 다른 복사 에미턴스를 가지므로 이 차이를 검출하여 2차원으로 영상화 할 수 있는데 이러한 장비를 열상장비(thermal imaging system)라 한다.

열상장비는 빛의 유무나 반사되는 빛의세기 차이가 아닌 물체의 온도차이를 영상화하므로 건물의 열손실 탐지, 탱크 내부의 저장량 측정, 전승 선로의 감시, 침입자 탐지등에 많이 이용되고 있으며 최근에는 인쇄회로 기판의 검사와 분석, 위성에 의한 기상관측, 의료기기등에도 적용되고 있고 점차 그 응용 범위가 확대되어 가고 있다. 본 논문에서는 직병렬주사-표준 TV 영상 재현방식으로 구현된 관측용 열상장비의 광학 및 전기 전자 하드웨어의 설계 기술과 제작 및 실험결과를 설명한다.

2. 열상장비의 구성

단일 검출기(single detector)를 이용한 이축 주사(two-axes scan) 구조의 열상장비 기본 구성은 그림 1과 같다.^[2] 여기서 적외선 광학계는 표적의 복사에미턴스를 적외선 검출기 면상에 집속시키는 역할을 하며 신호처리기는 검출기로 부터의 미약한 전기적 신호를 적절히 증폭하여 재현장치에 포

사한다. 이축 주사장치는 전체 시계내의 영상정보가 순차적으로 검출기에 입사되도록 하며 재현장치와는 정확히 동기되어 있다. 그런데 단일 검출기를 이용하여 영상을 구현하는 경우 표준 TV 정도의 분해능(resolution)을 갖게 하기 위해서는 주사 속도가 대단히 빨라야 하고 요구되는 신호 대역폭도 커서 출력은 그에 상응하는 많은 잡음을 가지게 된다.

따라서 최근의 열상장비는 보통 여러개의 동일특성의 배열 검출기(detector array)를 이용하고 있으며 검출소자를 수직방향으로 배열하여 수평방향으로 주사하는 병렬주사(parallel scan) 방법과 검출소자를 수평방향으로 부분 배열하여 수평 및 수직 방향으로 주사하는 직렬주사(serial scan) 방법이 많이 사용되고 있다. 이때 직렬주사에서 검출신호들은 적분지연선(integrating delay line)을 통해 더해지므로 \sqrt{N} 배의 신호대 잡음비 개선효과를 갖는다. 병렬 및 직렬 주사 역시 신호의 균일성이나 주사속도 면에서 서로 장단점을 가지므로 이들의 장점을 결합시킨 직병렬 주사(serial-parallel scan) 방식을 취하기도 한다^[3]. 직병렬 주사 방식에서 검출기는 부분적인 행렬(matrix) 배열을 가지며 수직 방향의 검출기 열(column)은 주사속도를 완화시키고, 수평방향의 검출기 행(row)은 신호대 잡음비를 개선시키며 신호를 균일하게 하는 역할을 한다.

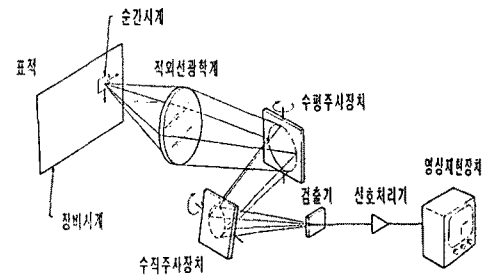


그림 1. 단일 검출기를 이용한 열상장비의 구성

본 연구에서는 행렬 배열의 적외선 검출기를 이용하여 직병렬 주사 방식의 열상관측 장비를 설계, 제작하였다. 수평 방향 주사장치로는 회전 다면경(rotating polygon)을 이용하였으며 수직 방향 주사장치로는 진동 평면경(oscillating mirror)을 이용하여 이축 주사 구조를 구현하였다. 5개로 이루어진 검출기 행으로 부터 동시에 출력되는 영상의 전기적 신호들을 적절히 증폭 조절한 뒤 디지털 메모리에 저장하였다가 표준 TV 영상 재현에 적합한 직렬 영상신호로 변환하였으며 EPROM(Erasable Programmable Read Only Memory)과 카운터(counter)들로 주사장치와 정확히 동기되도록 하였다.

3. 직병렬 주사방식 열상장비의 설계 및 제작

3.1 주사장치

여러 형태의 직병렬 주사 방법중에서 비교적 기본 시계각을 넓게 할 수 있으며 특수한 광학부품을 필요로 하지 않는 회전다면경-진동평면경 방식을 채택하여 독자적으로 설계하였다. 순간 시계의 영상정보는 회전 다면경의 회전에 의해 수평 방향으로 주사되는데 표준 TV의 RS-170 신호는 1/60초 동안의 1 필드(field)에서 262.5선의 영상정보를 재현하므로 수직 방향의 검출기 행 수가 5개인 경우 1 필드동안 52.5선의 비율로 회전다면경이 회전되어야 한다. 따라서 회전다면경을 고속 회전 시키기 위하여는 히스테리시스 동기 모터(hysteresis synchronous motor)를 이용하였다. 히스테리시스 동기 모터의 주된 특징은 회전속도가 입력구동 주파수에 의해 정확히 동기되고 제어된다는 점이며 회전속도는 전압의 변화와는 관계가 없다.

한편 수직 주사용 진동평면경은 1/60초의 주기로 틸트와 진동을 해야 하므로 이의 구동은 선형성이 좋고 응답이 빠른 galvanometric 모터를 사용하였다. 구동회로는 모터에 내장된 위치센서를 이용한 PID 제어방식을 채택하였다.

회전다면경을 수평주사에 사용하는 2차원 주사 광학계에는 필연적으로 동수차(pupil aberration)가 생기게 되므로 동수차를 최소로 줄이기 위해 광학계는 릴레이(relay) 방식으로 설계하였다. 즉 주사장치 입사동에 진동평면경을 놓고 출사동에 회전다면경을 놓아 회전다면경에 의한 수평주사를 릴레이 반사경을 사용하여 수직주사경에 전달해 주는 방식으로 구성하였다. 이를 개략적으로 나타내면 그림 2와 같다.

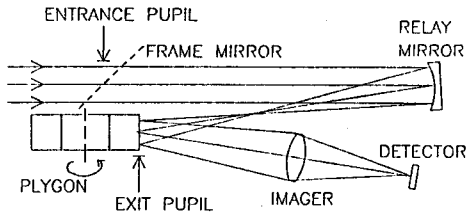


그림 2. 주사 광학계의 개략도

3.2 신호처리기

열상장비에서 전자회로로 제작되는 신호처리기는 크게 4개 부분으로 구성된다. 소신호 증폭 및 조정부는 적외선 검출기로부터 나오는 미약한 영상 신호를 신호처리에 적당한 형태로 증폭시키고 시계내의 영상정보가 갖는 동적범위(dynamic range)가 충분히 표현되도록 조정한다. 주사 변환부는 5개 채널을 통해 동시에 들어오는 신호의 이득이 균일하도록 조정하며 이 신호를 직렬신호로 변환한다. 비디오 신호처리부는 영상 개선회로와 복합신호 다중화 회로로 구성되며 영상신호에 동기신호를 부과하여 RS-170 영상 신호체계를 갖는 비디오 신호로 규격화 한다. 동기 발생부는 수평주사의 회전 다면경으로부터 발생된 트리거 펄스를 기준으로 하여 주사장치와 제원 신호간의 동기가 정확히 일치되도록 관련된 모든 동기신호를 발생시킨다. 이와 별도로 수평/수직 주사 모터의 구동을 위한 구동회로와 각 회로에서 필요로 하는 전원을 공급하는 전원 공급부가 있으며 이의 기본 구성도는 그림 3과 같다.

그림에서 소신호 증폭 및 조정부는 검출기 바이어스 회로, 초단증폭회로가 포함된 전단증폭기, 영상의 대조비를 자동 또는 수동으로 조절할 수 있도록 한 후단증폭기 및 아날로그 영상신호를 디지털 신호로 변환시 발생하는 aliasing 현상과 불

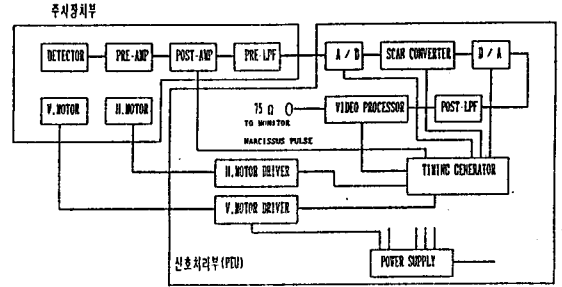


그림 3. 신호처리기의 기본 구성도

필요한 고주파 잡음을 제거하기 위한 저역통과필터로 구성하였다. 특히 수십 μV 정도의 미약한 검출기 신호를 영상 신호처리에 적합한 충분한 크기($2V_{pp}$)로 증폭하기 위해서는 회로 설계시 잡음의 유입을 막기위한 신호 대역폭의 제한, 전원의 filtering/grounding, 그리고 발진을 막기위한 부품 배치등이 중요한 설계요인이 된다.

주사변환부는 병렬 5채널 아날로그 영상 신호를 디지털 신호로 바꾸어 주는 A/D 변환기, 5채널 디지털 신호를 메모리에 저장하였다가 동기 발생부의 어드레스 신호에 따라 1채널의 직렬신호로 출력하는 다중화기 및 출력된 디지털 신호를 비디오 신호에 적합한 아날로그 신호로 바꾸어 주는 D/A 변환기로 구성하였다. 비디오 신호 처리부는 잡음 제거용 디지털 필터를 포함하며 후단 저역 통과 필터, 영상의 모서리 부분과 같이 밝기의 변화가 큰 부분을 강조하여 윤곽선을 뚜렷하게 하므로써 시각적 효과를 높이는 영상개선기, 영상신호와 부호신호에 동기신호를 부과하여 RS-170 영상 신호체계를 갖는 비디오 신호를 만드는 복합 신호 다중화기 등으로 구성하였다. 동기 발생부는 병렬 신호를 직렬 신호로 다중화하기 위한 어드레스 카운터와 비디오 신호와 주사장치 신호와의 시간적 어긋남을 보정하는 싱크로나이저(synchronizer)로 구성하였다.

3.3 적외선 망원경계

적외선 망원경계는 주사장치 앞 부분에 부착되며 광학적인 배율기 역할을 한다. 망원경의 기본 형태는 변조전달함수(MTF) 특성이 좋고 제작이 용이한 굴절 망원경계로 채택하였다. 망원경은 렌즈매수를 최소로 하고 광투과율을 높이기 위해 주 굴절능을 갖는 Ge 렌즈와 색수차 보정 및 비열화(athermalization) 보정을 위한 ZnSe 렌즈로 대물렌즈를 구성하고 Ge 렌즈들로 접안렌즈를 구성하였다.

적외선 망원경계, 주사장치 및 신호처리기로 구성되어 제작된 관측용 열상장비의 형태는 그림 4와 같다.

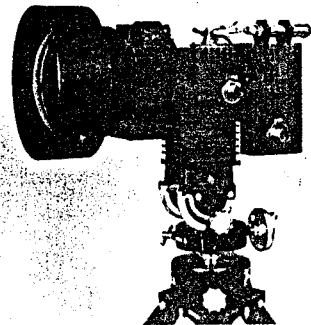


그림 4. 제작된 열상장비 사진

4. 특성실험 및 결과

관측용 열상장비의 경우 여러가지 성능평가 요소가 있으나 장비의 성능을 열 분해능의 개념에서 종합적으로 나타내는 척도로 최소분해 가능 온도차(MRTD : Minimum Resolvable Temperature Difference)가 사용된다. 이 개념은 특정 크기의 표적이 어느 정도의 배경과의 온도차이를 가질때 식별할 수 있는가를 나타내는 것으로 표적크기의 역수 즉, 공간주파수(spatial frequency)의 합수로 표현된다. 실제로는 중형비가 7:1인 막대표적 4개를 표적 넓이 간격으로 균일하게 세운뒤 표적과 배경의 온도차를 줄여가면서 측정하여 막대 표적이 분해가 되는 최소 온도차를 기록하게 된다. 또 막대 표적들의 크기를 줄여가면서 측정을 반복하면 공간주파수에 따라 도표로 최소분해 가능 온도차를 표현할 수 있다. 이때 표적과 배경은 흑색로 간주한다.

그림 5는 최소분해 가능 온도차를 측정하기 위한 실험장치의 구성도이다. 열상장비를 시준기(collimator)와 정렬한 후 가장 낮은 공간 주파수의 시험 표적을 적외선 광원 위치에 설치하고 표적과 배경과의 온도차 ΔT 를 0°C로 고정 시킨다. ΔT 를 서서히 변화시키면서 재현장치에서 관측자가 표적(four bar target)을 분해할 수 있는 ΔT 의 최소값을 기록한다. 측정온도가 작아지도록 같은 표적에 대해 반복측정하며 또 표적의 크기를 줄여가면서 즉, 공간 주파수를 크게 하면서 측정을 반복한 뒤 공간 주파수의 합수로 최소분해 가능 온도차를 표시한다.

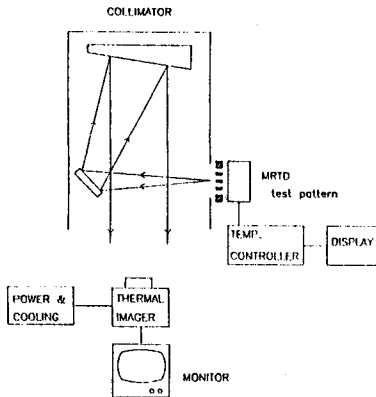


그림 5. 최소분해 가능 온도차의 측정장치 구성도

7.5 cycle/mm의 공간주파수에서 이론적인 최소분해 가능 온도차는 0.45°C였다. 그림 5의 측정장치를 이용하여 개발장비의 최소분해 가능 온도차를 측정된 결과는 0.5°C로 측정된 값이 설계된 이론값과 거의 일치함을 알 수 있었으며 여러 다른 공간주파수에서의 경우도 동일한 결과를 얻을 수 있었다. 그림 6은 빛이 전혀 없는 상태에서 획득된 영상으로 광학적/열적 분해능과 영상의 질이 우수함을 알 수 있다.



그림 6. 개발된 열상장비의 영상

5. 결 론

본 연구에서는 직병렬주사-표준 TV 영상재현 방식으로 관측용 열상장비를 개발 하였다. 열상장비 관련기술은 수동형 센서(passive sensor) 및 영상정보 획득 분야에서의 첨단기술이며 여러 구현 방법중 직병렬 주사-표준 TV 영상재현 방식이 보다 새롭게 체계화되고 있다. 국내에서 최초로 위 방식의 열상장비에 관련된 설계 및 제작 기술을 확보하였으며 최소분해 가능 온도차(MRTD) 측정결과 이론적 설계값과 거의 일치하는 우수한 성능을 얻었다. 본 연구를 통하여 획득된 구성품 관련 기술들은 아날로그 극소신호의 저잡음 증폭기술, 아날로그/디지털 실시간 영상 신호처리 기술, 초 고속 시스템 동기처리 및 다중화 기술 및 적외선 주사장치/광학계 설계 기술등이며 열상장비 분야에서 모두 독자적인 방법으로 구현하였다.

개발된 열상장비는 주사장치 및 신호처리기를 기본으로 광학적 배율기인 적외선 망원경계를 부착하여 관측용으로 많은 응용분야에 적용 가능토록 하였다. 향후 적외선 집속렌즈(condensing lens)의 설계, 온도차이에 따른 칼라영상재현(color-display) 방법의 구현등으로 더 많은 산업계, 의료계의 효과적 이용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] R. D. Hudson Jr., Infrared System Engineering. John Wiley & Sons Inc., N.Y., 1969.
- [2] J. M. Lloyd, Thermal Imaging Systems. Plenum Press, N.Y., 1975.
- [3] 홍 석민, 송 인섭, 권 우근, 김 재기, "적외선 열 영상 장비의 기본 원리 및 기술동향," 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp.1255-1259, 1992.