

적외선 열 영상장비의 기본원리 및 기술동향

홍석민, 송인섭, 권우근, 김재기
국방과학연구소

THE BASIC PRINCIPLES AND TECHNICAL TRENDS OF THERMAL IMAGING SYSTEMS

S.M.Hong, I.S.Song, W.K.Kwon, J.K.Kim
Agency for Defense Development

ABSTRACT

All matter above absolute zero emits thermal energy. Thermal imaging system converts the infrared radiation of a scene into a live picture of that scene; the thermal image is a pictorial representation of temperature differences. This paper has outlined the principles of thermal imaging and has briefly reviewed the history, and the present day and future technology.

1. 서 론

모든 물체는 절대온도 0도(0° K=-273.16° C) 이상에서 복사 에너지를 방출한다. 이 에너지는 0° K 이상의 온도를 가진 물체 내부의 원자 및 분자의 진동과 회전으로 인해 생성되며 원천(source)으로부터 바깥쪽으로 직진하고 진공 또는 공기, 가스(gas), 액체 및 고체등의 물리적 전달체를 통하여 전파된다. 보통 상온(300° K)에 존재하는 관측대상물들은 그림 1.1의 스펙트럼 분포로 볼 때 눈에 보이는 가시광선(visible light)이 아닌 적외선 영역의 에너지를 방출한다. 따라서 외계로부터 빛의 공급이 전혀없는 야간에도 표적자체가 발하는 에너지를 모아 눈으로 볼 수 있는 가시광선으로 변환시켜 관측하는 장비가 있을 수 있는 데 이러한 장비를 열 영상장비(thermal imaging systems:이하 열상장비로 칭함)라 한다.

열상장비는 물체 고유의 복사에미턴스(radiant emittance)의 차이, 궁극적으로는 물체의 온도차이를 영상화하므로 건물, 열 손실 탐지, 탱크 내부의 저장량 측정, 침입자 탐지 등 많은 산업용, 의학용 또는 군사용 응용분야를 갖고 있다. 본고에서는 앞으로 점차 그 응용범위가 증대될 것으로 판단되는 열상장비 분야의 기본원리와 요구되는 기술, 기술의 발전추세 등을 살펴본다. 이 분야에 대한 산, 학, 연 관계자들의 적극적인 관심과 연구 참여를 유도하고자 한다.

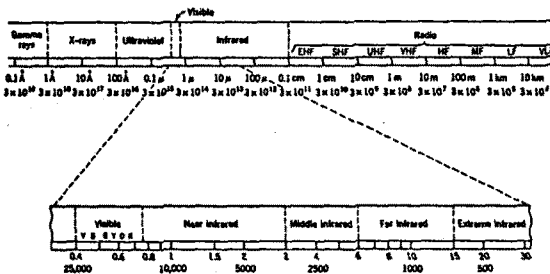


그림 1.1 가시광선 및 적외선 영역의 스펙트럼 분포

본 고의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 열상장비에 적용되는 열 복사이론과 대기투과 특성을 살펴본다. 3장에서는 열상장비의 기본 구성을 살펴보고 4장에서는 지금까지 계속 연구되어온 선진국의 기술현황을 주로 적외선 검출기 측면에서 다룬다. 5장에서 차세대 열상장비로 연구되고 있는 초점면 배열 검출기술 및 이를 이용한 열상장비 기술추세를 기술하고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 복사이론과 대기투과특성

열 에너지의 복사는 분자들의 진동과 회전에 의한 복사이외에도 다른 열원(heated sources)들로 부터의 복사에너지를 반사시키는 경우도 있다. 따라서 열 복사는 물체의 복사방출효율(radiation emission efficiency)에 따라 다음의 3가지로 구분한다. 첫째 흑체(blackbody)는 이상적인 경우로 주어진 온도에서 최대 이론치의 열 복사를 방출하고 또 흡수하는 물체를 말하며 이때 복사율(emissivity) ϵ 은 모든 관심 파장에서 1이다. 둘째 회색체(greybody)는 규정한 파장 범위내에서 흑체가 발하는 복사 에미턴스와의 비율인 복사율이 ϵ =상수(<1 인 물체이다. 마지막으로 선택 복사체(selective radiator)는 파장 λ 에 의존하는 복사율 즉, $O_{\epsilon}(\lambda)$ 을 갖는 물체이다. 대부분의 표적은 회색체 또는 선택 복사체이나 실제 계산상 어려움이 있으므로 수식 전개에는 물체를 흑체로 가정한다.

한편 물체를 Lambertian source 와 흑체로 가정할 경우 물체로부터 방출되는 파장별 복사 에미턴스 즉, 분광 복사 에미턴스(spectral radiant emittance)는 Planck의 법칙(Planck's blackbody radiation law)으로 표현될 수 있는 데

$$W_{\lambda}(\lambda, T) = \left(\frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \right) \left(\frac{1}{\exp\left(\frac{hc}{\lambda kT}\right) - 1} \right) \quad [\text{watt/cm}^2] \quad (2.1)$$

이다. 여기서 $W_{\lambda}(\lambda, T)$ 는 흑체의 온도가 절대온도 T° K일 때 그 흑체가 외부로 방출하는 단위 시간당, 단위 면적당의 파장별 복사 에너지를 의미하며 c는 진공중의 빛의 속도 즉, $c=2.9979 \times 10^{10}$ [cm/sec]이고 h는 플랑크 상수(Planck's constant: $h=6.6256 \times 10^{-34}$ [watt·sec²]), k는 볼츠만 상수(Boltzmann's constant: $k=1.38054 \times 10^{-23}$ [watt·sec/° K])이다. 또 λ 는 특정 파장([cm])을 의미하며 T는 물체를 흑체로 가정했을 때 흑체의 온도이다. 식 (2.1)을 보면 각각의 흑체온도에 따라 방출되는 최대 복사 에너지의 파장이 변화함을 알 수 있는데 이는 Planck의 법칙을 파장에 대해 미분함으로써 구할 수 있다. 온도별 최대 복사파장은 Wien의 변위법칙(displacement law)으로 표현된다. 즉,

$$\lambda_m \cdot T = a \quad (2.2)$$

이며 여기서 T는 흑체의 온도, λ_m 는 방출되는 최대 복사 에미턴스의 파장이고 a는 상수로써 2897.8 [$\mu\text{m} \cdot \text{K}$]이다. 식 (2.2)로부터 표면온도가 6000° K 정도인 태양의 경우 복사 에미턴

스의 최대치가 가시광선 영역에 있음을 알 수 있으며, 통상의 관측 대상물들은 대부분 상온 즉, 300° K 정도에 존재하여 그때 최대 복사 에미턴스 방출파장은 10μm 정도의 원격외선(far infrared) 영역에 존재함을 알 수 있다.

Planck의 법칙에서 파장을 0부터 ∞까지 분광 복사 에미턴스를 적분하면 1 cm²의 단위 면적의 T° K 흑체에서 반구(hemisphere) 형태로 방출되는 총 복사 에미턴스를 구할 수 있는 데 이는 Stefan-Boltzmann 법칙으로 부터 다음과 같이 표현된다.

$$W(T) = \int_0^{\infty} W_{\lambda}(\lambda, T) d\lambda$$

$$= \left(\frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} \right) T^4 = \sigma T^4 \quad (2.3)$$

여기서 각각의 계수는 식 (2.1)에서의 계수와 동일하며 σ는 Stefan-Boltzmann 상수로 5.67×10⁻¹²[watt/cm²° K⁴]이다.

한편 열상장비로 표적을 관측한다는 개념은 표적과 배경의 복사 에미턴스의 차이를 검출한다고 볼 수 있는 데 배경의 복사 에미턴스(W_B), 표적의 복사 에미턴스(W_T), 흑체 온도 T의 변화에 따른 복사 에미턴스의 변화량(∂W/∂T) 및 복사 대조비(C_R: radiation contrast)는 규정된 파장대역에서 각각 다음과 같이 표현된다. 수식에서 T_T 및 T_B는 각각 표적과 배경의 절대온도이다.

$$W_B = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda}(T_B) d\lambda \quad (2.4)$$

$$W_T = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_{\lambda}(T_T) d\lambda \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial W}{\partial T} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\partial W_{\lambda}(T_B)}{\partial T} d\lambda \quad (2.6)$$

$$C_R = \frac{W_T - W_B}{W_T + W_B} \quad (2.7)$$

여기서 식 (2.7)의 복사대조비가 결국 표적과 배경의 복사 에미턴스의 차이 즉, 열상장비로 영상을 구성할 수 있는 신호의 크기 차이가 되므로 매우 중요한 양이 되며 여러 다른 형태로도 표현될 수 있다. 복사대조비는 모든 파장에 걸친 흑체방출인 경우 매우 간단하게 나타낼 수 있는 데 Stefan-Boltzmann 법칙에서 W(T) = σT⁴ 이 되어

$$\frac{\partial W(T)}{\partial T} = 4\sigma T^3$$

이 되므로

$$C_R = \frac{4\sigma T^3 \Delta T}{2\sigma T^4 + 4T^3 \Delta T}$$

$$= \frac{2 \Delta T}{T + 2 \Delta T}$$

$$= \frac{2 \Delta T}{T} \quad (2.8)$$

로 T가 ΔT 보다 큰 경우 표현가능하다. 식 (2.8)의 의미는 표적과 배경을 각각 대응되는 흑체로 보았을 때 열상장비는 두 물체의 복사 에미턴스의 차이를 감지하여 영상화하는 장비 또는 두 물체 사이의 온도차를 감지하여 영상화하는 장비라고 표현할 수 있음을 나타낸다.

표적이나 배경의 적외선 영역의 열복사는 대기중의 가스분자, 분자덩어리(aerosols), 비, 눈이나 스모크, 안개, 아지빙 및 연무등 수증기 성분에 의해 흡수되거나 산란되어 그 양이 감쇄되기 마련이며 흡수분자들로서는 이밖에 이산화탄소, 오존등을 들 수 있다. 특히 흡수분자에 의한 대기투과특성은 그림 2.1 과 같은 대 중 6.3 μm의 수증기 밴드와 2.7 및 15μm의 이산화탄소 밴드는 대기투과특성에 심하게 영향을 미쳐 2개의 투과특성이 우수한 영역이 형성된다. 이 영역 즉, 3-5μm

의 영역과 8-14μm의 영역을 대기창(atmospheric window)이라고 부른다. 열상장비는 통상적인 관측대상물이 상온에 존재하여 10μm 파장대에서 가장 큰 복사 에미턴스를 방출한다는 특성과 8-14μm 파장대가 대기투과특성이 우수하다는 점을 이용하여 주로 8-14μm 파장대역에서 복사 에너지를 집중, 검출 및 전기적 신호처리를 통해 다시 가시광선으로 재현 시키게 되는 데 3-5μm 파장대를 이용하기도 한다.

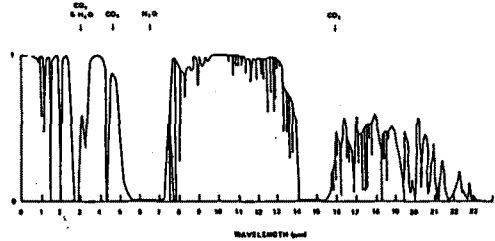


그림 2.1 대기투과특성의 예(300m 거리)

3. 열상장비의 구조 및 구성

단일 검출기(single detector)를 이용한 이축 주사(dual-axes scan) 구조의 열상장비 기본구성을 그림 3.1에 표현하였다. 그림에서 적외선 광학계는 표적의 복사 에너지(에미턴스)를 적외선 검출기면 상에 집중시키는 역할을 한다. 하나의 검출기에는 장비의 시계(field-of-view)내의 극히 일부분의 영상정보가 특정순간에 집중되어 대응되는 전기적 신호로 변환되는 데 이때의 작은 영상정보 영역 즉, 하나의 검출기가 순간적으로 정보를 획득할 수 있는 공간적인 영역을 순간시계라고 한다. 이축 주사장치는 전체 시계내의 영상정보가 순간시계의 영상정보로 분할되어 순차적으로 적외선 검출기에 입사되도록 함으로써 하나의 검출기를 가지고 2차원의 영상이 재현될 수 있도록 한다. 적외선 검출기는 입사되는 표적의 복사조도에 따라 그에 대응되는 전기적 신호를 주사장치의 이동에 따라 연속적으로 발생시키며 신호처리부에서는 모니터에 재현하기 적절하도록 증폭하고 처리하며 주사장치와 동기를 일치시킨다.

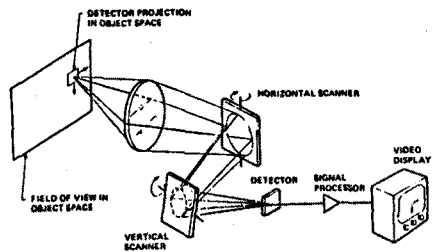


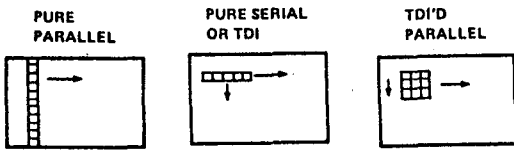
그림 3.1 단일 검출기를 이용한 열상장비의 구성

열상장비에 사용되는 원격외선 광학계는 파장대역이 원격외선이고 그에 따라 사용되는 광학초자만 다른 뿐 일반적으로 가시광선 광학계와 같은 역할을 한다. 이 경우 사용가능한 광학초자는 비결정성(amorphous)인 일반 광학유리와는 달리 단결정(crystal) 또는 다결정(polycrystalline) 재질이 대부분이며 굴절률이 매우 크고 온도변화에 따른 굴절률 변화가 크다. 굴절률이 크므로 같은 굴절능의 렌즈를 만들 경우 상대적으로 곡률반경이 작아져 수차가 작아지는 장점이 있으나, 반면에 공기와의 굴절률 차이가 크기때문에 표면에서의 반사가 커져 광투과율을 높이기 위한 무반사 코팅(anti-reflection coating)이 매우 중요함을 알 수 있다.

영상을 화면에 재현하여 실시간으로 관측하기 위해서는 화면

을 1초에 적어도 16번 이상(실제로는 25-30번) 재현하여야 하므로 단일 검출기로 영상을 구현하는 경우 주사속도가 대단히 빨라지고 요구되는 신호 대역폭이 커져 출력은 그에 상응하는 많은 잡음을 가지게 된다. 따라서 단일 소자 검출기를 이용하는 열상장비는 그 성능이 제한되어 점차 여러개의 검출기로 구성된 동일특성의 배열 검출기(detector array)가 실용화됨으로써 현재의 열상장비들은 검출기의 배열방법에 따른 독특한 주사장치를 갖는다.

선형 배열 검출기를 이용한 열상장비의 경우 검출기 배열 방법에 따라 주사방법이 병렬주사(parallel scanning)와 직렬주사(serial scanning)로 나뉜다. 병렬주사 방식은 그림 3.2와 같이 수직배열의 검출기에 포적영상을 수평방향으로 주사시킴으로써 한 영상면(field image)을 형성한다. 이때의 주사율은 모니터의 화면율과 같으면 되므로 요구되는 신호대역폭이 작아 높은 신호대 잡음비를 얻을 수 있다. 그러나 신호처리회로가 수직으로 배열된 검출기의 갯수만큼 개별적으로 요구되고 검출기 소자, 증폭기, 재현장치(LED)배열등의 개개 성능이 극도로 균일하여야 한다. 만약 그렇지 못하면 영상에 줄무늬가 지게 된다. 직렬주사 방식은 역시 그림 3.2와 같이 소수의 검출기 N 개를 수평방향으로 배열하여 대상장면을 수평방향으로 매우 빠르게, 수직으로 화면율을 가지고 주사한다. 각 검출기의 출력신호는 병렬주사 방식과는 달리 적분지연선(integrating delay line)을 통하여 더해지므로 한 대상점에 대하여 하나의 영상신호가 형성된다. 이 방식은 궁극적으로 단일 검출기에 의해 주사되는 시스템과 유사하나 이론적으로 N 배의 신호대 잡음비 개선효과를 얻을 수 있다. 직렬주사 방식은 병렬주사 방식의 근본적 결함인 주사선 간의 영상 불균일성을 해결할 수 있고 별도의 주사변환 없이 표준 TV 모니터에 맞는 직렬신호를 얻기가 용이하다는 장점이 있으나, 수평주사의 속도가 대단히 빠르므로 구동 메카니즘의 구현이 어렵고 또 성능상 제한 요소가 따르게 된다. 최근에 개발되고 있는 열상장비들은 검출기를 행렬(matrix)로 배열하여 직렬주사의 균일한 영상 및 신호대 잡음비 개선효과 그리고 병렬주사의 낮은 주사속도 및 작은 신호 대역폭의 장점을 결합시킨 직병렬주사(serial-parallel scanning) 방식을 취하는 것이 보통이다.



(a) 병렬주사 (b) 직렬주사 (c) 직병렬주사
 그림 3.2 기본적인 주사 방법

적외선 검출기는 크게 열 검출기(thermal detector)와 양자 검출기(quantum detector: photon detector와 superconducting detector로 구분될 수 있으나 주로 photon detector를 의미)로 나누어 진다. 열 검출기에 투사되는 적외선 복사 에너지의 차이는 작은 온도변화를 가져오게 되어 검출소자의 전기적 특성이 바뀌게 한다. 열 검출기는 냉각장치를 필요로 하지 않으나 양자 검출기에 비하여 반응속도가 매우 느리므로 화재 및 침입자의 검출, 원격조정 감지기(remote sensing)등 비영상 시스템(nonimaging system)으로 많이 이용된다. 열검출기에 속하는 것으로는 열전대(thermocouple), 볼로미터(bolometer), 초전기 비디콘(pyroelectric vidicon) 등이 있는데 초전기 비디콘은 다른 열 검출기와는 달리 표적온도의 시간변화에 반응하기 때문에 영상소자로 이용할 수 있지만 냉각시킨 양자 검출기에 비하여 감도가 떨어진다.

열상장비에 이용되는 대부분의 검출기는 양자 검출기이다. 양자 검출기에 입사되는 복사 에너지는 그의 강도(intensity)

에 따라 초과반송자(excess carrier)들을 발생시키는 데 이의 반응속도는 매우 빨라 보통 μsec 단위이다. 양자 검출기는 밴드갭(bandgap) 에너지가 검출되는 광자 에너지 보다 작은 반도체이다. 그 에너지의 양은 3-5 μm 검출의 경우 약 0.25eV이고 8-14 μm 검출의 경우는 약 0.1eV이므로 반도체 재질도 잘 알려진 실리콘(1.15eV)이나 게르마늄(0.75eV)등은 적합하지 않다. 오늘날 이에 가장 적합한 물질은 PbSnTe와 특히 HgCdTe (CMT 또는 MCT로 표기)로써 그들의 조성비를 변화시킴으로써 8-14 μm 또는 3-5 μm 의 파장대에 각각 사용할 수 있다.

양자 검출기는 작동모드에 따라 크게 광기전성(photovoltaic)과 광전도성(photoconductive)으로 나뉜다. 광기전성 검출기에서는 밴드갭 에너지보다 큰 광자 에너지가 입사되면 p-n접합에서 페르미 준위의 변화를 가져오고 이는 외부의 전자회로에 의해 관측되는 기전력의 변화를 형성한다. 광전도성 검출기에서는 반도체의 전도도(conductivity)가 초과 반송자의 수에 비례하여 증가하게 되고 이때 검출기가 바이어스되어 전도도의 변화가 곧 전압의 변화로 나타나게 한 것이다. PbSnTe는 광기전성 검출기이고 CMT 역시 광기전성 검출기로 사용할 수 있으나 현재에는 대부분 광전도성 검출기로 사용하고 있다. 광전도성 검출기는 일반적으로 요구되는 전단증폭기에 쉽게 연결되기 때문에 많이 사용된다. 그러나 많은 검출기 소자가 근접하여 함께 사용되는 초점면 배열 검출기(focal plane array detector)의 경우는 바이어스 전류에 의해 발생하는 열의 냉각이 문제가 되므로 최근에는 바이어스 전류가 필요하지 않은 광기전성 검출기가 개발되어 실용화되었다.

상온에서 적외선 양자 검출기의 신호출력은 매우 미약하고 반도체에서 전자-정공 쌍의 랜덤(random)한 생성 및 재결합에 의한 열 잡음(thermal noise)에 압도되어 버리기 때문에 검출기를 포적 영상이 관측되도록 작은 온도차이도 식별될 수 있게 민감(sensitive)하게 만들고 열잡음으로부터의 반응과 명백히 구별할 수 있게 하기 위하여 검출기는 냉각온도(cryogenic temperature)까지 냉각되어야 한다. 냉각온도는 보통 3-5 μm 파장대의 검출에는 약 193° K(-80° C)이고 8-14 μm 파장대의 검출에는 80° K(-193° C) 정도이나 경우에 따라서 즉, 검출기의 재질에 따라서 각각 다르며 4° K 정도까지 헬륨을 이용하여 냉각시키기도 한다.

열상장비의 신호처리부는 적외선 검출기에서 나오는 전기적 영상정보를 재현장치(display)에 가시광선으로 재 구성하는 역할을 한다. AC 결합으로 검출기에서 나오는 신호정보는 수 μV - 수 mV 정도로 매우 미약하므로 영상재현에 필요한 전압 레벨로 바꾸어 주는 증폭기, 동시에 몇개의 검출소자로부터 나오는 병렬신호를 비디오 영상재현에 적합한 직렬신호로 변환하는 다중기(multiplexer 또는 scan converter), 비디오 복합영상 신호를 구현하고 화면 조정 기능을 수행하는 영상처리기 및 주사장치와 재현장치의 동기를 일정하게 맞추어 주는 동기신호 발생기가 신호처리부의 기본 구성이 된다. 이밖에도 각 전자회로 부분에 전원을 공급하여 주는 전원공급기가 있으며 수평 및 수직주사 거울을 구동하기 위한 모터 구동 및 제어회로도 필요하다. 이러한 신호처리부는 실제로는 검출기의 특성과 배열의 형상에 따른 주사형태 및 요구되는 재현장치의 형태에 크게 의존하여 구성된다. 따라서 병렬주사 방식과 직렬주사 방식에 따라 신호처리부의 기본 구성이 달라지게 되며 직접 육안 관측방식과 모니터 재현 간접관측 방식등 관측 방식에 따라라도 신호처리부의 구현방식이 달라진다.

4. 열상장비의 개발현황

열상장비에서 가장 중요한 핵심 기술은 복사에너지의 차이를 전기적 신호로 변환하여 주는 검출기에 있으므로 열상장비의 개발은 곧 적외선 검출기의 발전과정과 밀접한 관계가 있다. 1800년 영국의 허셸(W.Herschel)이 온도계를 이용하여 태양

스펙트럼중에서 적외선이라는 새로운 영역의 전자파를 발견한 이래 제1차 세계대전 이전까지 모두 3종류의 적외선 검출기가 발명 또는 고안되었는 바 그들은 Seebeck에 의한 열전대(thermocouple)와 Langley에 의한 볼로미터(bolometer)이다.

1917년에 이르러 T.W.Case가 적외선 영역에서 사용할 수 있는 최초의 양자 검출기를 소개하였다. TlS(thallidus sulfide)로 제작된 이 검출기는 광자 검출기의 전자적 구조에 직접적으로 작용하는 새로운 형태였으며 최초 검출기의 응답특성은 약 1.4 μm 정도였다. 이는 제2차 세계대전 이후 급속한 발전을 보아 적외선 영역까지 검출이 가능하게 되었으며 이전의 볼로미터나 열전대열(thermopile)보다 감도와 응답시간이 대단히 우수하였다.

열상장비의 효시로는 1930년의 Evaporograph를 들 수 있는데 이는 일종의 기름막 변형장치로서 독일의 Czerny가 개발하였으나 감도 및 응답시간의 특성이 열상장비에 적합치 못하였다. 이후 1940년대에 이르러 두가지 형태로 개발방향이 결정되었는데 한가지는 이산형(discrete) 검출소자를 사용하는 기계적 주사방식으로 현재 대부분 적용하고 있는 방식이고 다른 한가지는 적외선 비디콘처럼 비기계적 주사방식이다. 이러한 개발방식에서 전자는 매우 성공적으로 개발되어 사용되고 있으며 후자는 1970년대 말 부터 IR-CCD(초점면 배열 검출기 IRFPAs를 의미)의 형태로 개발되기 시작하여 차기세대 열상장비의 주종을 이룰 전망이다.

1940년대 이후 기계적 주사방식에 의한 최초의 열상장비는 1952년 미 육군에서 개발한 Thermograph이다. 이것은 저속 주사장치를 단일 검출기에 적용하여 그 상을 사진판에 기록하는 장치로서 실시간 소자는 되지 못하였다. 이후 거듭된 개발로 현재는 이러한 Thermograph 유형의 장비가 산업기기로 사용되고 있다. 1940년대 이래로 적외선 양자검출기 제질에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔으며 초기의 소자들은 단일 검출소자로 구성되었다. 1940년대 후반과 1950년대 초에 3-5 μm 파장대에서 이용할 수 있는 PbSe, PbTe 및 InSb가 개발되었고 PbS도 이 영역까지 파장범위가 증대되었다. 동일기간에 8-14 μm 파장대 및 14-30 μm 파장대에서 사용하기 위한 게르마늄 외인성(extrinsic) 광전도성 검출기가 구리, 아연 및 금 등을 불순물로 하여 제작되었다. 1950년대 말 III-V, IV-VI 및 VI-VI 족 반도체 화합물이 처음 소개되었으며 영국에서 같은 시기에 처음 소개된 HgCdTe 등이 오늘날 조절 가능한 밴드갭 제질로 가장 많이 사용 되고 있다.

1960년대 초 사진식판술(photolithograph)의 개발로 PbS, PbSe 및 InSb 검출기들에 대한 선형배열 소자 제작이 가능하게 되었고 단결정 InSb 제질에 대한 광기전성 검출기 개발이 시작되었다. 또 1960년대 초에 외인성 수은(Hg) 첨가 게르마늄을 이용한 선형 배열 검출기가 최초로 FLIR(forward looking infrared)시스템에 탑재되어 원격외선 파장대에서 이용되었다. 이 경우 0.09eV의 활성 에너지를 제질이 갖고 있으므로 원격외선 파장대에서 잘 사용될 수 있었지만 외인성 여

기에 기인하는 검출원리 때문에 2단계 냉각장치를 사용하여 25° K에서 동작시켜야만 했다. 1960년대 말과 1970년대 초에 1세대 선형배열 진성(intrinsic) HgCdTe 광전도성 검출기가 개발되었다. 원격외선 FLIR 시스템에서 이용 가능하며 1단계 냉각장치를 이용하여 80° K로 동작시킨다. 기존의 방법에 대하여 이 재질을 이용하면 장비물 소형화 시킬 수 있고 전력소모가 적기 때문에 계속적으로 열상장비에 채택되었으며 현재도 대량 생산되고 있다. 이러한 적외선 검출기들의 재질별 검출도는 그림 4.1과 같다.

5. 기술발전추세

1970년대에 들어 개발된 전하결합소자(CCD: charge coupled device) 기술은 대규모 집적회로(VLSI) 기술 및 새로운 적외선 검출제질의 결정성장 기법의 개발들과 함께 2세대 열상 검출기인 적외선 초점면배열 검출기(IRFPAs: infrared focal plane arrays)의 제작에 큰 기여를 하게 되었다. 전하결합소자중 가시광선 영역에서 영상획득에 이용되고 있는 실리콘 전하결합소자(SI CCD)의 경우 현재 통상적으로 600x600 화소 배열의 검출소자가 이용되고 있으며 특수용도로 2048x2048 화소 배열의 검출소자도 제작되어 있다. 가시광선 영역의 활상소자들은 그동안 많이 이용되어 왔던 비디콘이나 플럼비콘(plumbicons) 등의 활상관 영상획득소자들에 대체되어 이용되고 있으며 특히 영상정보를 저장하여 순차적으로 모니터에 전달하는 다중화(multiplexing) 기법의 처리가 용이하다.

적외선 영역에서 위와 같은 실리콘 전하결합소자(검출제질 및 다중기에 모두 실리콘을 사용)가 사용될 수 없는 이유는 이미 기술된 바와 같이 3-5 μm 파장대와 8-14 μm 파장대에서 통상 요구되는 밴드갭 에너지가 0.25eV-0.1eV로써 실리콘이 적합하지 않기 때문이다. 따라서 일반적으로 IRFPAs는 작은 밴드갭 에너지를 갖는 반도체 검출소자와 실리콘 다중기의 결합구조로 이루어 진다. 실제 이들 제질간의 연결은 제작상의 큰 문제로 나타난다. 또 적외선 영역에서 표적의 영상신호 대조비는 대단히 낮고 양자잡음이 크게 나타나므로 잡음을 낮게 유지하기 위하여 검출소자의 냉각이 필요하게 된다. 그러므로 저온에서 고성능을 유지하는 냉각도 회로의 설계 및 제작이 IRFPAs 제작상의 큰 문제점으로 나타난다. 이밖에 기구적인 밀봉과 전기적 접합등도 냉각장치 결합상의 주요 고려사항이다. IRFPAs 검출기는 기존 검출기에 비하여 고밀도 2차원 배열 형성이 가능하고 신호처리를 초점면상에서 직접 행할 수 있어 적외선 광학계의 단순화, 스펙트럼 대역폭의 감소 및 빠른 화면을 얻을 수 있다. 또 일반적으로 개개의 검출소자에 필요한 전단층폭과 다중화 처리기의 소자수를 대폭적으로 줄일 수 있다. 특히 다중화 처리를 냉각용기(dewar)내에서 행할 경우 전체 시스템은 마치 하나의 검출소자를 갖는 열상시스템과 같이 단순화시킬 수 있다.

고밀도 적외선 검출기의 집적 소자수는 현재 주요 검출제질들로 이용되고 있는 PtSi, InSb 및 CMT의 경우에 마치 18개월 정도마다 2배의 속도로 집적도가 높아지고 있는 dynamic RAM IC에 비교될 정도로 지수적인 증가 추세를 보이고 있다. 검출기 소자수는 그림 5.1 에서와 같이 다만 5-10 년 정도의 차이

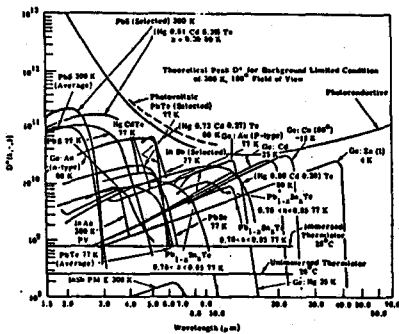


그림 4.1 적외선 검출기의 재질별 검출도

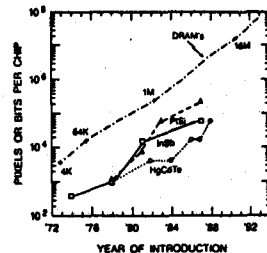


그림 5.1 적외선 검출기 집적도의 발전추세

만 있을 뿐 DRAM의 집적도와 동일한 비율로 증가하고 있다. 특히 PtSi 검출기의 경우 이미 512x512 소자 배열 검출기가 생산중이며 1024x1024 소자 배열 검출기도 개발완료 단계이다. CMT 및 InSb 검출기의 경우는 현재 256x256 소자 배열 검출기가 개발되어 있다. 또 그림 5.2는 차기세대 초점면 배열 적외선 검출기에 많이 이용되는 적외선 검출재료들과 차단파장을 표시한 것이다.

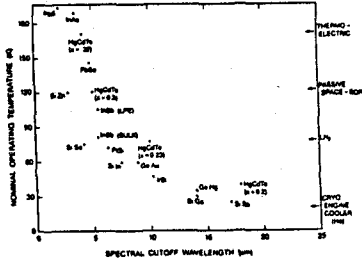


그림 5.2 적외선 검출재료의 작동온도와 차단파장

한편 이러한 초점면 배열 검출기를 사용하여 열상장비를 구성하는 방법 역시 기계적 주사 방식과 비기계적 주사방식의 두가지 형태로 구분될 수 있다. 고밀도 IRFPAs 검출기를 이용한 열상장비에서 주사(scanning array)방식을 이용하면 시간 지연적분(TDI: time delay integration) 효과를 갖게되어 검출기의 감도가 증가한다. 이러한 시간지연적분 효과는 현재 직병렬 주사방식을 사용하여 제작하고 있는 1세대 열상장비에서도 얻을 수 있는데 차기세대인 IRFPAs 에서는 전하결합소자 기술을 이용하여 검출기내에서 자체적으로 신호처리를 하므로 별도의 증폭기나 시간지연선, 다중화 장치등이 필요하지 않게 된다. 또 비주사(staring array)방식에 비하여 검출소자의 수가 파격적으로 제한되므로 제작이 용이하고 전력소모, 냉각용량의 측면에서도 유리하다. 비주사방식의 검출기를 이용하면 반대로 거의 모든 신호처리부등 검출기내에서 해결하며 기계적 주사장치가 필요없게 되어 비디오 신호처리부등 극히 제한된 회로만으로 간단한 장비를 구성할 수 있는 장점이 있다. 차기세대 개념의 2가지 열상장비 기본 구성도를 그림 5.3에 보였다.

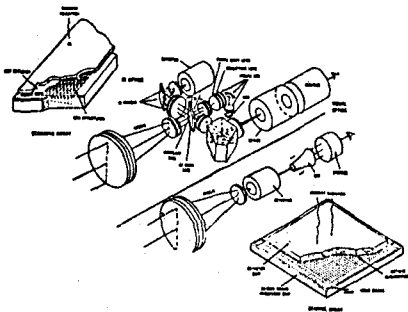


그림 5.3 차기세대 열상장비의 기본 구성도

열상장비 기술은 궁극적으로 비주사방식의 형태로 발전할 전망이지만 아직까지는 검출소자들의 균일성, 냉각용량의 증대와 역시 균일한 냉각, 제작상의 어려움등으로 주사방식이 병행되어 개발되고 있으며 시제품들이 출현하고 있는 상태이다. 1세대 장비에 비하여 월등한 성능이 기대되지만 2가지 형태 모두에 대해 제작상의 복잡함과 가격등의 요인으로 개발완료 되더라도 앞으로 상당기간 동안은 1세대 열상장비와 병용될 전망이다.

6. 결 론

본 고에서는 열상장비의 기본원리와 기술개발 동향에 대하여 기술하였다. 1940년대 양자검출기에 의한 표적 검출이 처음으로 실용화된 이래 1950년대와 1960년대를 거쳐 1970년대 초에 현재 1세대 열상장비라 불리는 광전도성 CMT 검출기를 이용한 열상장비가 실용화되었고 이어 선진국들은 자국 고유의 독자모형을 선정, 개발하게 되었다. 열상장비에서 가장 핵심적이고 중요한 부분인 주사장치부(검출기 포함)와 신호처리부를 공통으로 표준화하여 호환성 있게 제작하는 이런 방식을 공통 모듈(common module)이라 하며 미국, 영국, 프랑스등이 모두 자국 고유의 공통모듈을 가지고 있다. 또 주요한 부품인 적외선 검출기에 대한 연구도 1950년대 이래 꾸준히 진행되고 있어 현재 독자적인 검출기를 각각 생산하고 있으며 차기세대 열상장비를 위한 초점면 배열 검출기 개발에도 벌써 20여년 가까이 연구하고 있다.

국내에서 적외선 검출기나 직병렬 주사장치를 이용한 열상장비 연구는 1980년대 중반이후 및 1980년대 후반 이후부터 추진되고 있으나 아직 기술적으로 보완되어야 할 부분이 많다. 또 IRFPAs 검출기나 차기세대 열상장비의 연구는 진행되고 있지 못하다. 열상장비에 적용되어야 하는 기술들로는 적외선 검출 재료의 우수한 결정성장 기술, 극도로 균일한 소자 배열 제작 기술, 초고속의 전하결합소자 신호처리기술, 검출배열과 전하결합소자 배열간의 결합 기술, 아날로그 소신호의 증폭기술, 아날로그/디지털 영상 신호처리 기술, 초고속 소형 히스테리시스 동기모터 제작과 정밀 제어 기술, 적외선 광학계 설계 및 고부과율 코팅/제작 기술, 폐회로 냉각장치 제작과 역화기(cryostat)/냉각용기(dewar) 제작기술과 시스템 설계/평가 기술등으로 앞으로 전반적인 산업기술의 발전을 위해서 꼭 보되어야 할 것으로 판단된다. 이들 기술의 확보를 위해서는 보다 활발한 산.학.연 간의 정보 교류와 기술 협조, 꾸준한 연구노력, 또 산업체나 연구소 차원의 적극적인 지원 활동이 절실히 요청된다.

참 고 문 헌

- [1] J.M.Lloyd, Thermal Imaging Systems, Plenum Press, N.Y., 1975.
- [2] R.D.Hudson Jr, Infrared System Engineering, John Wiley & Sons Inc., N.Y., 1969.
- [3] W.L.Wolfe and G.J.Zissis, ed., The Infrared Handbook, 2nd ed., IRIA Center, 1985.
- [4] E.L.Dereniak and R.T.Sampson, ed., Infrared Detectors and Focal Plane Arrays, Proc. SPIE, vol.1308, April 1990.
- [5] M. A. Karim, ed., Special section on Infrared Imaging Systems, Optical Engineering, vol.30, no.11, Nov. 1991.
- [6] E.L.Dereniak, ed., Special section on Infrared Focal Plane Arrays, Optical Engineering, vol.26, no.3, Mar. 1987.
- [7] D.A.Scribner, M.R.Kruer, and J.M.Killiany, "Infrared focal plane array technology," Proc. IEEE, vol.79, no.1, pp.66-85, Jan. 1991.