

적외선 열화상 카메라를 이용한 열 측정 이론



연만형 | 한국원적외선응용평가연구원

1. 서론

적외선 복사 및 관련 열 측정 기술에 관한 내용은 적외선 열화상카메라를 사용하는 사람들에게는 아직도 생소할 수 있습니다. 이 부분에서는 열 측정 이론의 배경 지식에 관한 정보를 제공합니다.

2. 복사이론

적외선에 대한 기본 이론은 William Herschel이라는 사람에 의해 1800년에 간단하지만 제법 많은 실험을 통하여 적외선 복사의 발견을 이루어 냈다. 이 사람은 자신의 망원경을 직접 만든 천문학자이기도 하여 광학이나 렌즈에 대한 이론에도 상당히 정통한 사람이었다. 만약 돋보기 렌즈를 갖고 태양 빛에 맞추면 렌즈를 통과한 태양 빛은 작은 원을 만들게 되고 그 작은 원은 뜨거워지게 될 것이다. 빛 복사는 굴절되어 집결된다. 프리즘 또한 빛 복사를 굴절 시키는데 즉 프리즘은 하얀 빛을 여러 색상으로 쪼개어 준다. Herschel은 이러한 복사의 특성에 놀라워하였고 한마디로 그는 “프리즘으로 분광된 한줄기의 빛은 아마도 물체들의 온도를 올릴 수 있는 능력을 가지고 있을것”이라고 표명하고, 실험장으로 되돌아가 프리즘을 이용한 실험을 수행 한 기록에 따르면 “스펙트럼상의 여러 색 중에 적색선 밖(전)에서 열의 최고치가 도달하는 것을 보고 이것은 아마도 가시광절 바로 뒤에 놓여 있고, 그래서 복사열에 대한 색상은 사람의 눈으로 볼 수가

없고 더불어 이것은 가시 스펙트럼의 적색 부분 바로 뒤(전)에 존재한다.”라고 되어 있다. 그 후 적외선 복사 이론은 Plank, Wein과 Stefan-Boltzmann에 의하여 완성 되었는데 그중 Stefan-Boltzmann 법칙을 소개하면, 19세기 중반에 물리학 향방의 주요 문제 중의 하나는 역시 복사 스펙트럼에서 에너지 분산을 설명하는 것이었다. 공통된 경험은 물체 표면색깔에 나타나는 dark나 light색이 어떻게 열에 의존되어 흡수되었는지를 규명하는 것이었다. 19세기 후반 Josef Stefan은 흑체에서 방사된 전체 복사에너지는 그 절대온도의 4제곱에 비례

함으로서 복사된 전체 에너지의 양을 실험적으로 측정하여 종결되었으며, 결론은 몇 년 후 Ludwig Boltzmann에 의하여 이론적인 열역학적 관계로도 달하였다. 이 중요한 공식 이후로 Stefan-Boltzmann 법칙으로 알려져 오고 있다.

$$W = \sigma T^4 [\text{Watt}/\text{m}^2]$$

그 사이에 물리학자 Clark Maxwell은 이론적으로 전자파의 존재를 예측하였으며, 그것이 광파와 동일함을 입증하였고 Heinrich Hertz는 Maxwell의 예측을 확인하였으며 독일의 그의 실험실에서 전자파를 소개하였고 그것이 광파와 같은 속도로 전파되는 것을 보여주었다.

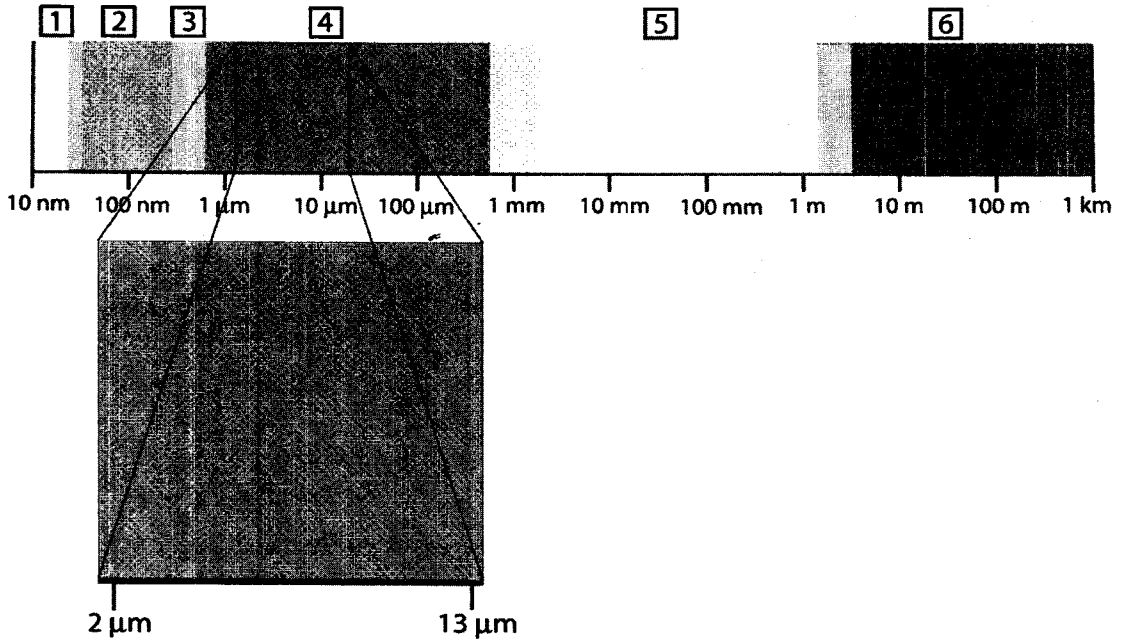


그림 1 전자기 스펙트럼 1: X-레이 2: 자외선 3: 가시선 4: 적외선 5: 극초단파 6: 음파

3. 전자기 스펙트럼

Electro-magnetic spectrum은 대역이라는 몇 개의 영역으로 세분되며, 이것이 X-레이, 자외선(Ultra violet), 가시광선(Visible), 적외선(Infrared) 극초단파(Micro wave), 음파(Radio wave)이다. 절대영도 이상의 온도를 갖는 물체는 그 표면으로부터 적외선을 방출하고 있다. 그리고 그 방출량은 물체의 온도와 밀접한 관계를 갖고 있는 것으로 알려져 있고, 물체로부터 방출되는 적외선 양을 측정함으로써 그 물체의 온도를 알 수 있다. 적외선은 그림1에서 나타낸 바와 같이 가시광선의 파장대 부터 전파의 단파장까지의 전자파로 되어 있으며, 그 파장범위는 0.72 μm 부터 약 1,000 μm 까지이다. 적외선 대역은 3단계 또는 4단계 대역으로 세분화되기도 한다.

3단계 대역은

- 1)근적외선 : 0.72 μm ~ 1.5 μm
- 2)중간적외선 : 1.5 μm ~ 5.6 μm
- 3)원적외선 : 5.6 μm ~ 1,000 μm

4단계 대역은

- 1)근적외선 : 0.75 μm ~ 3 μm
- 2)중간적외선 : 3 μm ~ 6 μm
- 3)원적외선 : 6 μm ~ 15 μm
- 4)극적외선 : 15 μm ~ 100 μm

적외선 열화상 카메라가 검출할 수 있는 적외선 파장 대역은 대기를 잘 투과하는 일명 '대기의 창' 이라 불리는 중간 적외선, 원적외선의 일부의 영역이 일반적이다. 전자를 단파장(SWB), 후자를 장파장(LWB)이라 부른다. 온도가 절대영도(0K 또는 -273 $^{\circ}\text{C}$)

이상이 되면 어느 물질이든 원자와 분자의 진동 또는 회전에 의하여 적외선을 방사, 흡수되고 있는 것으로 알려져 있다. 고체에서 적외선 방사를 고려한 기초가 되는 것은 흑체(black body)이다. 이는 어떠한 파장에서도 입사된 전체의 방사를 흡수하는 물체로 정의하고 있다.

4. 적외선 열화상 카메라

1. 개 요

적외선 열화상 카메라는 피사체의 실물을 보여주는 것이 아닌 피사체의 표면으로부터 복사(방사)되는 전자파의 일종인 적외선 파장 형태의 에너지(열)를 검출, 피사체 표면 복사열의 강도를 측정하여 강도의 양에 따라 각각의 다른 색상으로 나타내 주는 카메라이다. 처음에는 군사용으로 야간 전투에 응용할 목적으로 개발되었으며, 1960년 초반에 스웨덴에서 산업용으로 사용 할 목적으로 제작되어 전기설비에 최초로 응용, 사용되어 현재에 이르고 있다.

2. 구조 및 작동 원리

적외선 열화상 카메라의 구조는 렌즈, 검출기, 필터, 데이터처리장치, 저장장치로 구성되어 있으며 각각의 부위별 작동기능을 살펴보면 다음과 같다.

1) 렌즈

적외선 복사는 일반 가시광선과 같이 굴절(Refraction)과 반사(Reflection)의 성질을 갖고 있다. 그러므로 적외선 열화상 카메라의 렌즈도 일반 카메라의 렌즈도 일반 카메라와 유사한 방법으로 설계되었지만 일반 카메라에서 실물을 촬영하기 위하여 일반 유리로 제작된 렌즈로는 적외선 열화상 카메라에 장착하여 사용 할 수 없다. 그 이유는 전자파의 일종인 가시광선과 적외선 파장이 다르기 때문에 일반 렌즈로는 적외선 복사 에너지를 통과시키지 못하기 때문이다. 새로운 재질이 적외선 복사 에너지는 통과되고 일반 가시광선은 통과되지 않는데 이것이 게르마늄과 실리콘이다. 이러한 재질들은 쉽게 부서지지 않고 흡습성이 없으며 현대적인 제작방법으로 렌즈의 형태로 만들어 질 수 있는 특성이 있다. 그리고 이들 재질로 만들어진 렌즈는 적외선 복사에너지가 반사되지 않고 모두 통과되도록 하기 위하여 반 반사코팅을 하게 된다. 주로 실리콘 재질의 렌즈는 단파장대역용(3~5 μm)으로 그리고 게르마늄 재질의 렌즈는 장파장대역용(7.5~13 μm)으로 사용된다.

2) 필터

일반적으로 적외선 열화상 카메라는 모든 피사체의 표면 온도만을 측정 하여야만 되는데 간혹 일반 유리의 경우 고온에서는 열이 유리를 투과하는 경우가 있다. 그렇게 되면 실제 유리 표면으로부터 복사되는 에너지가 측정되는 것이 아니고 유리를 투과한 복사에너지가 측정되는 경우가 발생하는데 이를 방지하기 위하여 단지 유리 표면으로부터 복사되는 에너지만을 측정하기 위하여 필터가 장착되기도 하고, 특정온도(고온)를 측정하기 위하여 특정 파장만을 검출 할 목적으로 필터를 사용하기도 한다.

3) 검출기

적외선 복사 에너지에 대하여 감응하는 소자를 검출기(detector)라고 한다. 지난 몇 년 동안 수많은 검출기MCT(HgCdTe), InSb, PtSi들이 적외선 열화상 카메라에 사용되어져 왔고, 현재 일부는 계속 사용되어져 오고 있다. 최근에는 FPA(focal plane array) Uncooled Micro-boloeter라는 검출기가 개발되어 사용되고 있다. 이 검출기에서는 렌즈로부터 입사(入射)되어진 적외선 복사 에너지의 결과를 전기적 신호로 만들어 주는 역할을 한다. 모든 적외선 열화상 카메라에는 검출기의 온도 감응성 및 안정성을 위하여 냉각장치가 필요한데 냉각방식으로는 액화질소(LN₂)가스, 아르곤가스를 이용한 강냉 방식과 헬륨가스를 이용한 폐회로 순환 냉각방식(closed cycle cooling or stirling), TE(thermal electric) cooling은 peltier 효과를 이용한 전기 냉각방식이며, 요사이 FPA검출기에 있어 uncooled라는 용어가 있지만 실상은 검출기 옆에는 TE-Stabilizer(안정기)라고 하는 준 냉각 장치가 있다.

4) 데이터 처리장치

검출기로부터 발생된 전기신호를 받아 이 신호를 온도 값과 열화상으로 표현되도록 처리하여 주는 장치이다. 이 장치 안에는 이러한 작업이 이루어 질 수 있도록 하기 위하여 복잡한 여러 수식화 된

프로그래밍이 되어 있다. 한 예로 적외선 복사의 이론에서 많이 사용되어지는 공식 중 하나인 $W=f(\epsilon, T)$ 라는 것이 있어 피사체 표면으로부터 복사된 에너지(W)는 피사체 표면의 방사율(ϵ)과 피사체 절대온도(T)와 함수관계로 정의되기 때문에 이러한 공식을 이 처리 장치에 프로그래밍 하여 전기신호를 처리하여 주는 것이다.

5) 저장장치

상기절차를 통하여 만들어진 열화상은 좀 더 세밀한 분석을 위하여 메모리에 저장되어지는데 예전에는 아날로그 방식으로 일반 VTR Tape으로 녹화되었으나 전자기술이 발전하면서 플로피 디스켓, PCMCIA Card 그리고 최근에는 대용량의 SD Card등이 저장장치와 같은 디지털 매체가 사용되어지고 있다.

5. 적용 및 사용분야

적외선 열화상 카메라가 산업용으로 개발, 제조된 이후로 가장 널리 사용된 분야는 단연코 전기 분야이다. 열화상 분야는 진동(vibration)분석과 연계되어 최근 수십 년 동안 예방정비 산업분야에서 결함 진단 방법으로 독보적인 위치를 차지하고 있다. 그 외, 연구개발(R&D)분야, 공정관리, 의료용으로도 널리 사용되고 있다. 좀 더 구체적인 적용사례들을 보면, 예방정비에서는 전기관련 분야가 가장 널리 사용되고 있으며 발전, 송전, 배전, 옥내 분전반등의 접속개소, 대형변압기, 스위치 류 등의 전기적인 이상으로 인하여 발열되고 있는 현상들을 주기적으로 비접촉식 방법으로 설비들의 온도를 측정하여 설비들의 온도 경향을 분석하여 돌발적인 정전사고를 미연에 방지함으로써 원가절감 및 생산성 향상에 기여하고 있다. 회전기기분야에서는 펌프, 모터의 이상 작동 시에 발생할 수 있는 여러 증상들 중 발열 현상을 나타내는 베어링, 축 배열문제들을 예측, 진단하는 곳에 사용되고 있고 배관 관련분야에서는 석유화학, 제철소, 시멘트공장 등의 배관 및 KILN등의 내화재 손상 및 단열시공 불량 등으로 인하여 발생 될 수 있는 에너지 손실을 예방할 목적으로 사용되고 있다. 그 외 최근에는 특수

필터를 장착한 적외선 열화상 카메라 중에는 VOC가스의 누출을 검지 할 수 있는 것도 개발되어 석유화학, 타이어공장, 정유공장 등에서 사용되어지고 있다. 다음으로 연구개발목적으로 사용되고 있는 사례들은 전자, 자동차, 유리, 제철, 고무, 군수등의 여러 곳에 사용되고 있는데 전자의 경우는 전자제품의 회로를 구성하는 PCB (회로기판)의 열분석을 통하여 각각의 부품들의 정상 작동여부를 파악하고 부하 용량 적정여부를 판단하는데 이용되며, 기구설계 시에 전체 기구의 통풍 설계를 위한 열 분산 연구에도 사용되고 있다. 최근에 발표된 사용 사례집에 보면 휴대폰 전화기의 장시간 사용에 따른 발열로 인하여 사람의 얼굴에 영향을 주는데 이에 대한 연구사례도 있다. 자동차분야는 엔진룸, 타이어, De-frost, 브레이크 패드 등의 연구에 사용되고 있는데 그 중에서도 De-frost의 사용례는 De-frost를 작동 시에 최적으로 잘 되도록 풍향의 위치 등을 재배치하거나 열선의 구조를 적정하게 설계하는데 사용되고 있고, 브레이크 패드의 경우 자동차 주행시에 브레이크를 동작하였을 경우 마모상태나 온도가 발생 하면서 발생될 수 있는 요인들을 미연에 방지 할 목적으로 사용되고 있다. 제철, 유리, 고무(플라스틱)들은 온도에 따른 물성 변화가 많은 재질이어서 온도 제어가 중요한 분야이다. 따라서 제조공정 중에 온도 제어, 관리를 하기 위하여 사용되고 있으며 군수용의 연구개발은 목표물 추적 및 화염 연소분석 등에서 사용 되고 있다.

6. 맺음말

오늘날 적외선 열화상 카메라의 사용 용도는 점점 널리 사용되고 있는데 이는 경제적(가격), 사회적(사용자의 요구, 인식)으로 보편화되었기 때문일 것이다. 이 카메라가 처음 산업용으로 개발된 1960년대 초의 카메라와 현재의 카메라의 발전과정 및 가격변화를 토대로 미래를 예측해 본다면 이 장비는 온도를 측정(접촉식으로 불가한 경우)하고자 하는 곳에는 누구나 손쉽게 사용할 수 있도록 개발, 제조될 것으로 예상된다.