Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography
Vol. 40, No. 1, 41-49, 2022
https://doi.org/10.7848/ksgpc.2022.40.1.41

ISSN 1598-4850(Print)
ISSN 2288-260X(Online)
Original article

드론 열화상 화소값의 타겟 온도변환을 위한 방사율 영향 분석

Study on the Effect of Emissivity for Estimation of the Surface Temperature from Drone-based Thermal Images

조현정[1] · 이재왕[2] · 정나영[3] · 오재홍[4]
Jo, Hyeon Jeong · Lee, Jae Wang · Jung, Na Young · Oh, Jae Hong

Abstract

Recently interests on the application of thermal cameras have increased with the advance of image analysis technology. Aside from a simple image acquisition, applications such as digital twin and thermal image management systems have gained popularity. To this end, we studied the effect of emissivity on the DN (Digital Number) value in the process of derivation of a relational expression for converting DN to an actual surface temperature. The DN value is a number representing the spectral band value of the thermal image, and is an important element constituting the thermal image data. However, the DN value is not a temperature value indicating the actual surface temperature, but a brightness value indicating high and low heat as brightness, and has a non-linear relationship with the actual surface temperature. The reliable relationship between DN and the actual surface temperature is critical for a thermal image processing. We tested the relationship between the actual surface temperature and the DN value of the thermal image, and then the radiation adjustment was performed to better estimate actual surface temperatures. As a result, the relation graph between the actual surface temperature and the DN value similarly show linear pattern with the relation graph between the radiation-controlled non-contact thermometer and the DN value. And the non-contact temperature after adjusting the emissivity was closer to the actual surface temperature than before adjusting the emissivity.

Keywords : Thermal Photogrammetry, Drone, Digital Number, Emissivity, Temperature

초 록

최근 열화상 카메라의 수요 증가와 함께 열화상 카메라를 활용한 연구 또한 관심이 높아지고 있다. 그 중, 기존의 드론에 열화상 카메라를 부착하여 촬영하는 등의 단순 촬영에서 나아가 열 영상 처리를 통한 디지털 트윈 구축, 영상화된 데이터를 통한 관리 시스템 구축 등 열 영상 처리 후 데이터를 응용한 연구가 증가하고 있다. 본 논문에서는 열화상 카메라를 처리하는 과정에서 생성되는 화소값인 DN값(Digital Number)이 실제 표면 온도로 변환하기 위한 관계식 유도과정에서 방사율이 DN값에 미치는 영향을 알아보기 위한 연구를 진행하였다. DN값은 열 영상의 스펙트럼 밴드 값을 나타내는 숫자로 열 영상 데이터를 구성하는 중요한 요소이다. 하지만 DN값은 실제 표면 온도를 표시하는 온도 값이 아닌 열이 높고 낮음을 밝기로 표시한 밝기 값으로 실제 표면 온도와 비 선형적인 관계이다. 그러므로 열화상 카메라로 획득한 영상 이미지의 DN값을 실제 표면 온도와 관계성을 보일 수 있다면 데이터를 처리하기 수월하며, 더 많은 활용성을 기대할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 우선, 실제 표면 온도와 열 영상의 DN값의 관계를 분석하고, 열화상 카메라와 같은 원리로 작용하는 비접촉 열화상 온도계가 실제 표면 온도에 근접한 참값으로 변환할 수 있도록 방사 조정을 진행하였다. 그 결과 실제 표면 온도 및 DN값의 관계 그래프와 방사 조정된 비접촉 열화상 온도계 및 DN값의 관계 그래프가 유사한 선형관계를 보였으며 방사율을 조정하기 전보다 조정한 후의 비접촉 온도가 실제 표면 온도에 더 근접한 결과를 얻었다.

핵심어 : 열화상 사진측량, 드론, 화소값, 방사율, 온도

Received 2022. 01. 23, Revised 2022. 02. 09, Accepted 2022. 02. 24

1) Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, M.S. student, Korea Maritime and Ocean University (E-mail: white1995cho@gmail.com)
2) Dept. of Civil Engineering, Undergraduate student, Korea Maritime and Ocean University (E-mail: jnso5072@outlook.kr)
3) Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, M.S. student, Korea Maritime and Ocean University (imzero24@naver.com)
4) Corresponding Author, Member, Dept. of Civil Engineering, Associate Professor, Korea Maritime and Ocean University (E-mail: jhoh@kmou.ac.kr)

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

최근, 드론을 이용하여 빠르고 손쉽게 열 영상을 획득하기 시작하면서 드론 사진 촬영을 통해 획득된 열 영상을 이용한 연구 또한 급증하고 있다. 예를 들어 농업 분야에서는, 드론을 활용하여 직접적인 농작물을 재배하기 위해 이에 영향을 미치는 가뭄 모니터링 체계를 구축을 위하여 열화상 센서를 사용한 토양 온도 산출을 진행하였고(Ham *et al*., 2019), 시설관리 분야에서는, 열 영상 드론을 이용하여 태양광 발전설비를 통한 에너지 생산량의 품질 관리 최적화 실험에서 드론을 활용한 검사의 경제적 이점을 확인하였다(Muntwyler *et al*, 2015). 또한, 싱크홀을 조기 감지하거나(Lee *et al*, 2016), 저수지의 누수를 진단하는 등 다양한 분야에서 열화상 카메라 부착 드론을 사용하고 있다(Lee *et al*, 2018). 특히 건설 분야에서는 열화상 카메라를 이용하여 비파괴검사를 진행하거나 콘크리트 균열을 예방 및 진단하는 연구(Hwang, 2020)가 주로 이루어지고 있고, 4차 혁명으로 인한 디지털 트윈 구축을 위하여 건물 및 구조물 매핑에 관한 연구(Bae *et al*, 2019)에 대한 관심도가 급증하고 있다.

드론 등에 장착된 열 영상 카메라로 획득한 온도 값은 카메라의 열 영상 데이터 처리 과정을 거치는데, 이 과정에서 영상의 화소값인 DN (Digital Number)값인 이미지 속성이 나타나게 된다. DN값은 영상소 값 또는 화소값이라고 불리며 수치영상 하나의 픽셀 수치를 나타낸다. 일반적으로, DN값은 일반 카메라로 촬영 시 기본적으로 0~255의 값을 가지지만, 적외선 열화상 카메라로 촬영 시 이미지의 밴드값은 비트 수의 증가로 인해 그 이상이 될 수 있다. DN값은 열 영상 데이터에서 표면 온도의 상대적인 높낮이를 유추할 수 있고, 온도의 증가와 감소 등을 파악할 수 있다. 즉, 열 영상 데이터 처리를 하여 공간 데이터 생성을 할 때는 온도의 상대적인 수치 이외에도 높은 정확성을 가진 온도 값을 얻는 것이 필요하다. 그러나 DN값은 물체의 표면에 나타나는 열을 밝기 온도 값으로 나타낸 것으로 실제 표면 온도와 달라 열 영상의 처리된 데이터를 섭씨온도로써 사용하지 못한다. 따라서 DN값을 실제 표면 온도로 표현하기 위해서는 픽셀 밝기 온도 값으로 나타나는 DN값을 조정할 필요가 있다.

DN값은 물체의 방사율, 반사된 추정 온도, 물체와 카메라 간의 거리, 상대 습도, 주변 온도 등에 따라 달라지는데(FLIR, 2013), 특히 물체의 방사율이 물체의 복사 온도를 결정하는데 가장 큰 영향을 끼치며 이로 인해 방사율을 조정하는 것은 DN값을 결정하는 것에 중요한 역할을 한다. Kelly *et al*.(2019)은 보정되지 않은 UAV의 적외선 열화상 카메라에서 온도 데이터를 도출하기 위하여 일정 흑체 복사 온도에서의 DN값의 관계식을 구하였다. 또, Zheng *et al*.(2020)은 드론으로 열 영상을 촬영하고 이를 3D 모델로 구축에서 온도의 정확도를 높이기 위한 연구를 진행하였으며, 이 과정에서 열화상 카메라에 사용하는 온도와 DN 변환식을 사용하였다.

본 연구에서는 드론을 이용하여 열 영상을 촬영하고 생성된 DN값과 열 화상 카메라와 같은 파장 영역을 사용하는 적외선 비접촉 온도계, 실제 표면 온도와 같은 값을 측정할 수 있는 표면 접촉 온도계를 사용하여 비교하였다. 또, 흑체 복사 온도와 DN값 사이의 상관관계, 열화상 카메라의 온도와 DN 관계식에 관한 선행연구와 본 실험에서 측정한 온도 값을 비교 및 분석을 추가적으로 진행하였다.

2. 방법론

2.1 적외선 스펙트럼

가시 영상과 달리 눈에 보이지 않는 열 영상은 적외선 영역을 사용하며, 전자기파의 스펙트럼에서 이 적외선 영역은 대략 0.9㎛~14㎛이다. 열 화상은 이러한 적외선 영역의 카메라를 사용하여 대상 물체 및 카메라 내의 온도 값 차이를 보여주므로 비접촉 방식으로 측정가능하다. 여기서 온도가 절대 온도 이상인 모든 물체는 적외선을 방사하며 그 방사하는 양은 온도에 따라 증가한다.

적외선 열화상 카메라는 일반 카메라와 동일한 반사, 굴절, 전달 등의 광학적 특성을 가져 구조적으로 거의 유사하다. 그러나 적외선 열화상 카메라의 주요 구성 부분 중 적외선만을 통과시키는 렌즈가 있다는 점에서 일반 카메라와 다르다. 따라서 열화상 카메라를 이용하여 물체 온도를 측정할 시에는 적외선을 방사하는 양을 알아내는 것이 중요하다.

2.2 열복사의 원리

물체에서 방사되는 복사에너지의 강도는 온도 및 복사되는 전자기파의 파장에 따라 달라지는데, 물체 온도가 약 500°C 이하일 경우 복사광선은 대부분 적외선 파장 대역에 속한다(FLIR, 2016). 또, 물체는 복사선 방사뿐 아니라 주위환경에서 입사되는 복사선을 흡수, 반사, 투과하는 반응도 일어난다. 따라서 에너지 보존 법칙에 따라 이를 식으로 나타낸 총 복사 법칙(Total Radiation Law)은 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_\lambda = I_{\gamma\lambda} + I_{t\lambda} + I_{a\lambda} \tag{1}$$

where, I_λ is the incident amount, $I_{\gamma\lambda}$ is the reflection

amount, $I_{t\lambda}$ is the transmission amount, $I_{a\lambda}$ is the absorption amount.

여기서, 양변을 I_λ로 나누어 간단하게 변경하면 아래와 같은 Eq. (2)를 유도할 수 있다.

$$1 = \frac{I_{\gamma\lambda}}{I_\lambda} + \frac{I_{t\lambda}}{I_\lambda} + \frac{I_{a\lambda}}{I_\lambda} \equiv \gamma_\lambda + t_\lambda + \alpha_\lambda \quad (2)$$

where, γ_λ is the reflectance, t_λ is the transmittance, α_λ is the absorption, and the sum of them all up equals 1.

각각의 값은 어떤 물체에 입사광선이 들어올 때 반사, 투과 또는 흡수시키는 정도에 따라 0에서 1까지의 값으로 나타난다. 예를 들어, 입사하는 모든 복사를 반사하거나 투과시키지 않고 흡수하는 이상적인 물체인 흑체(blackbody)는 $\gamma_\lambda = 0, t_\lambda = 0, \alpha_\lambda = 1$의 값으로 나타난다. 또, 흑체가 아닌 현재 실존하는 모든 물체를 회색체(greybody)라고 하며, 회색체는 γ_λ, t_λ, α_λ 모두 0과 1이 아닌 그 사이 값으로 표시된다. 흑체의 복사 법칙(Radiation Equation)은 파장과 온도의 함수로 구성되는데, 흑체 관련 공식은 키르히호프 법칙(Kirchhoff's Law), 플랭크의 법칙(Planck's Law), 빈의 변위 법칙(Wien's Displacement Law), 그리고 슈테판-볼츠만 법칙(Stefan-Boltzmann Law)으로 설명할 수 있다.

우선 흑체는 완전한 복사에너지를 갖는 방사체로 정의되며 이를 표현한 수식이 키르히호프의 법칙이고, 아래 Eq. (3)과 같이 나타난다.

$$\alpha_\lambda = \varepsilon_\lambda \quad (3)$$

Where, ε_λ is the emissivity of the object.

α_λ, ε_λ 모두 파장 λ에 따라 달라진다. 위의 식에서 알 수 있듯이 키르히호프 법칙은 좋은 흡수체가 좋은 방출체라는 것을 의미한다. 또, 흑체의 복사 조도는 플랭크 법칙을 사용하여 아래의 흑체 복사 조도 공식 Eq. (4)로 표시할 수 있다 (Kuenzer and Dech, 2013).

$$M_\lambda = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} \quad (4)$$

In this formula, M_λ is the amount of energy emitted by an object whose wavelength $\lambda[\mu m]$ is absolute temperature $T[K]$. That is, M_λ is spectral radiant exitance. And c is speed of light$[Wm^{-2}\mu m^{-1}]$, h is Planck's constant $[2.9979246 \times 10^8 ms^{-1}]$, k is Boltzmann constant $[1.3806 \times 10^{-23} JK^{-1}]$.

위의 식에서 알 수 있듯이 나머지 값이 상수인 것과 달리 변수는 온도 $T[K]$ 하나로, 복사 조도는 온도만의 함수이며 온도를 알면 복사 조도를 구할 수 있다. 하지만 일반적으로 플랭크 법칙의 수식은 복잡하여 파장 길이와 복사 조도로 이루어진 아래 그래프와 같이 표현된다(Fig. 1). 플랭크 법칙은 파장과 온도에 따라 방출하는 에너지가 변화하는 법칙으로 아래 그래프는 절대 온도(6000K, 4000K 등)에 따른 복사 조도를 나타낸다. 그래프에서 파란색으로 표시된 영역은 가시 영역(VIS)을 뜻하며 초록색 점선은 빈의 법칙을, 노란 빗금 영역은 슈테판-볼츠만 법칙을 나타낸다.

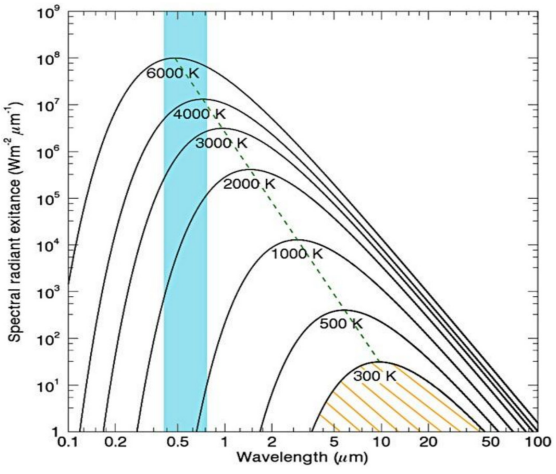


Fig. 1. The diagram of Planck's Law(Kuenzer and Dech, 2013)

위 그래프에서 각 절대 온도는 일정한 파장에서 뚜렷한 최댓값을 가지며 이것은 아래 빈의 법칙을 사용하여 계산할 수 있다. 예를 들어, 위의 그래프에서 절대 온도가 1000K인 물체는 최대 복사 강도에서의 파장 $\lambda_{\max}$는 2.9878μm이 된다(Eq. (5)).

$$\lambda_{\max} = \frac{2987.8}{T}\mu m \quad (5)$$

마지막으로 슈테판-볼츠만 법칙은 흑체가 방출하는 열 복

사에너지가 파장이 감소하면 온도가 증가한다는 플랭크 법칙으로 계산 가능하며 아래 Eq. (6)으로 알려져 있다.

$$T_{RadBB} = \sigma T_{kin}^{4} \tag{6}$$

흑체가방출하는열복사에너지 T_{RadBB}는절대온도 T의네제곱과 슈테판-볼츠만 상수 $\sigma[5.6697\times10^{-8}\,Wm^{-2}K^{-4}]$의 곱에 비례한다. 즉, 온도 차이가 2배인 두 물질의 열복사 에너지는 16배의 차이를 보인다는 것이다. 위의 4가지 법칙은 물체를 흑체로 가정하였을 때 온도를 유추하거나 복사 강도와 온도 관계를 알기 위한 중요한 공식이다. 하지만 열화상 카메라로 촬영하는 물체는 흑체가 아니므로 일반 물체의 온도를 표현하기 위해서는 또 다른 방법이 필요하다.

2.3 방사율

방사율(Emissivity)은 흑체에서 복사되는 에너지와 일반 물체에서 복사되는 에너지의 비율로써 0과 1 사이의 값을 가진다. 아래 식은 방사율을 Eq. (7)로 나타낸 것으로 물체에서 복사되는 에너지 즉, 방사율이 높을수록 더 큰 값으로 계산된다.

$$\varepsilon = W_{obj} / W_{bb} \tag{7}$$

앞서 언급했던 회색체는 모든 파장 대역에서 이 방사율이 동일한 물질을 의미한다. 하지만 대부분의 실존하는 물체는 흑체도, 회색체도 아니므로 방사율은 파장에 따라 달라진다. 실제로 물체와 열화상 카메라 사이에는 대기가 존재하여 복사에너지를 감쇠시키고 이로 인해 감쇠 복사에너지가 복사 스펙트럼의 파장에 따라서 크게 달라져 방사율 값에도 영향을 미친다. 따라서 열화상 카메라를 이용하여 열 영상 이미지를 얻을 때 정확도를 높이기 위해서는 방사율 고려가 필수적이다.

2.4 총 복사에너지

열화상 카메라 전문 기관인 FLIR사는 카메라를 사용하여 물체 온도를 산출할 때, 대상 물체 자체의 복사 방출, 주변 복사 방출의 반사, 그리고 대기의 복사 방출에 총 복사 법칙을 적용하였다(FLIR, 2016). Fig. 2는 열화상 카메라가 대상 물체와 주변 환경에서 발생하는 복사에너지를 측정하는 원리를 설명하였으며, 카메라에 입력되는 총 복사에너지 W_t는 다음 Eq. (8)과 같다.

$$W_t = \varepsilon\times\tau\times W_{obj} + (1-\varepsilon)\times\tau\times W_{refl} + (1-\tau)\times W_{atm} \tag{8}$$

Where, ε is the emissivity of the object, τ is the transmittance of the atmosphere, and W_{obj}, W_{refl}, W_{atm} are the radiant energy radiated from the object, the surrounding environment, and the atmosphere.

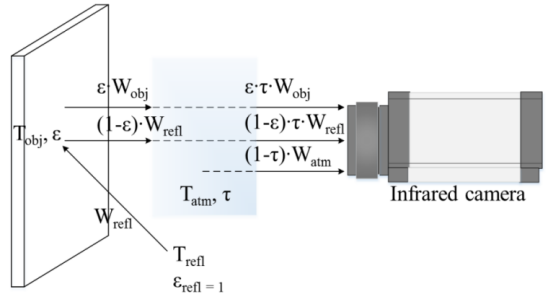


Fig. 2. Principle of the infrared camera(Jung *at el.*, 2018)

2.5 흑체 복사에너지와 DN값의 관계식

흑체 복사에너지는 완전 흑체에서 발생하는 전자기 복사에너지를 의미하며 흑체 복사에너지가 온도와 밀접한 관련이 있는 만큼 DN값에 있어서도 관계가 있다. Kelly *et al.*(2019)은 보정되지 않은 UAV의 적외선 열화상 카메라에서 온도 데이터를 도출하기 위한 과정에서 흑체 복사 온도와 DN값의 관계식 Eqs. (9), (10)을 도출하였다.

$$DN = 25\,T_{bb} + 7593 \tag{9}$$

$$DN = 23\,T_{bb} + 8748 \tag{10}$$

위의 Eqs. (9), (10)는 각각 주변 공기의 온도가 10℃, 21℃일 때, 흑체의 온도 와 DN값의 관계를 나타낸다. Fig. 3은 위의 두 식 Eqs. (9), (10)를 그래프로 표현한 것으로 빨간 선과 주황 선은 각각 카메라에서 측정된 온도가 38.9℃, 20.3℃일 때 흑체 온도에 따른 DN값을 추세선으로 나타낸 것이다.

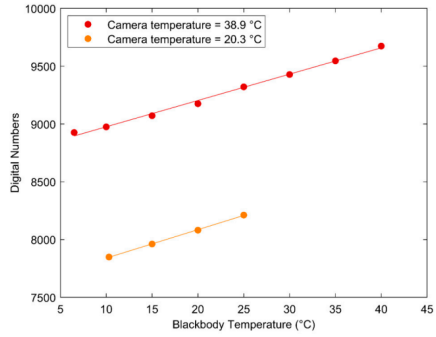


Fig. 3. Relationship between blackbody temperature and DNs

2.6 방사율 보정 기법

물체의 표면은 일반적으로 약 0.1에서 0.95 사이의 방사율을 나타내며 사람의 피부는 0.98의 방사율을 보인다. 물체의 실제 표면 온도의 참값에 도달하기 위해서는 적외선 열화상 온도계로 측정 시 방사율을 보정하는 것이 중요한데, 크게 3가지 방법이 있다.

첫 번째는, 방사율 표를 이용하여 직접 방사율을 보정하는 것이다. 하지만, 방사율 표를 이용하면 특정한 환경 온도에 있는 방사율 값만을 얻게 되는 한계가 있고, 표면 처리가 일반적이지 않거나, 다양한 재료를 사용한 경우 정확한 방사율 값을 사용하기 힘들다. 두 번째는, 절연테이프나 검정 스프레이 등과 같이 방사율이 높은 물질을 이용하여 특정 부분의 온도를 측정하는 것이다. 마지막으로, 방사율 보정 전 반사 온도 값을 넣어 직접 방사율을 찾는 방법이 있다. 이 방법은 실제 온도와 같은 접촉식 온도계를 이용하여 대상 물질의 온도를 측정하고 열화상 카메라에서 나오는 온도와 일치시킴으로써 방사율을 찾는 것이다.

열화상 카메라는 정규화된 14비트의 DN을 출력하는데, 14비트의 DN의 신호 출력을 변환에는 Flux-linear 및 T-linear 두 가지 유형이 쓰이며, 본 실험에 사용된 Zenmuse XT는 T-linear에 속한다(Zheng *et al*, 2020). T-linear 출력 데이터는 고해상도 또는 저해상도 모드의 두 가지 해상도를 사용 가능한데, 고해상도일 때와 저해상도일 때의 데이터 식은 다음과 같다(Eqs. (11),(12)).

$$T_{scene} = 0.04 \times S - 273.15 \tag{11}$$

$$T_{scene} = 0.4 \times S - 273.15 \tag{12}$$

where, T_{scene} is the temperature of the scene in centigrade and S is the DN(14-bit).

하지만 위의 방사율 보정 기법은 일정한 환경적 요건에서 적용 가능한 수식으로, 환경적인 요소가 추가될 경우 변동이 생길 수 있다. 이에 Park *et al*. (2018)은 식(13)을 사용하여 드론으로 촬영한 열 영상 이미지의 DN값을 실제 표면 온도로 변환한 예를 보였다.

$$\begin{aligned}
H_2O &= Hum * \mathrm{EXP}(1.5587 + 0.06939 * AirT - 0.00027816 * AirT + 0.00000068455 * AirT) \\
Raw_{Refl} &= \frac{PlanckR1}{PlanckR2 * (\mathrm{EXP}(\frac{PlanckB}{AirT + 273.15}) - PlanckF)} - PlanckO \\
T &= X * \mathrm{EXP}(-\sqrt{Dist} * (\alpha_1 + \beta_1 * \sqrt{H_2O})) + (1 - X) * \mathrm{EXP}(-\sqrt{Dist}) * (\alpha_1 + \beta_1 * \sqrt{H_2O})) \\
RawAtmos_{Refl} &= \frac{PlanckR1}{PlanckR2 * (\mathrm{EXP}(\frac{PlanckB}{RAT + 273.15}) - PlanckF)} - PlanckO \\
Raw_{object} &= \frac{DN - ((1-\tau) - RawAtmos_{refl}) - (1-E) * Raw_{Refl}}{\frac{E}{\tau}} \\
T_{object} &= \frac{PlanckB}{LN(\frac{PlanckR1}{PlanckR2 * (Raw_{object} + PlanckO)} + PlanckF)} - 273.15
\end{aligned} \tag{13}$$

where, $PlankR1, PlankR2, PlanckB, PlanckF, PlanckO, \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2, X$ are parameter of thermal infrared sensor, which is a eigen-value stored per sensor to calculate atmospheric attenuation. And Dist is Distance to target, RAT is Reflected Apparent Temperature(varies with sky condition and humidity), Hum is humidity, AirT is Air Temperature, E is Emissivity.

3. 실험 방법 및 결과

본 연구의 절차는 Fig. 3과 같다. 우선, DN값을 얻기 위하여 드론을 이용한 열화상 이미지 촬영을 진행하고, 획득한 DN값 중 타겟점에 해당하는 값들을 유효값으로 따로 분류한다. 또, 표면 온도계와 적외선 열화상 온도계를 이용하여 타겟점의 온도를 측정한다. 여기서, 적외선 열화상 온도계의 경우 거리에 따라 차이가 있는 온도 변화를 고려하여 5cm, 50cm의 간격을 따로 두어 측정한다. 그 결과, 도출된 Graph 1 및 Graph 2와 Kelly *et al*.(2019)의 흑체 온도 그래프 및 T-linear 데이터 변환 식을 각각 비교하고 분석한다.

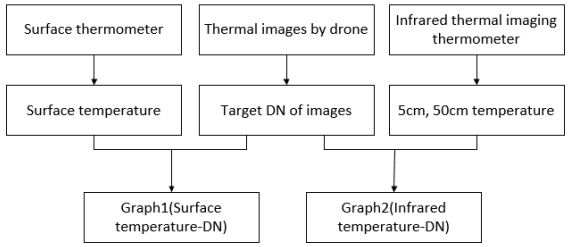


Fig. 4. The flowchart for generating graph 1 and graph 2

3.1 연구 지역 및 타겟점 설정

타겟점은 부산광역시 영도구 한국해양대학교 일대에서 여러 가지 서로 다른 재질로 이루어진 점으로 선정되었다(Fig. 5). 본 연구는 재질마다 온도 변화폭이 큰 여름의 정오에 진행되었으며 드론의 비행과 함께 온도를 측정하였다. 또, 각 재질은 목재, 화강안(탄화규소로 포장), 주철, 포장된 아스팔트로

1. wood -sun
2. silicon carbide(white) -sun
3. silicon carbide(black) -sun
4. cast iron -sun
5. asphalt pavement -sun
6. silicon carbide(white) -shade
7. silicon carbide(black) -shade
8. cast iron -shade

Fig. 5. Study area and target site

구성되며 같은 재질의 다른 표면 온도 비교를 위해 일조량에 따라 햇빛과 그늘로 영역을 나누어 측정하였다.

3.2 DN값 유효값 추출

열화상 이미지에서 DN값을 얻기 위하여 우선 적외선 열화상 카메라(Fig. 6(a))가 부착된 드론(Fig. 6(b))을 이용하여 열영상 촬영을 진행하였다. Table 1은 열화상 카메라의 설정과 드론의 촬영 설정값을 나타낸 것이다.

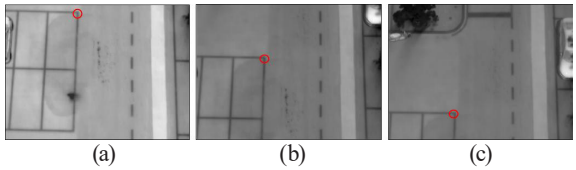
(a) (b)

Fig. 6. Zenmuse XT2 camera(a) and MATRICE 200 V2 drone(b)

Table 1. XT2 camera specification and MATRICE drone setting

Zenmuse XT2 thermal camera		MATRICE 200 V2 drone	
Focal Length	13mm	Flight Elevation	35m
FOV	25°×19°	Camera Angle	-70°
Pixel pitch	17 micron	Overlap	90%
Sensor size	336×256	Velocity	6m/s

드론으로 촬영된 열화상 이미지 Fig. 7은 Table 2와 같이 밴드값 속성을 가지게 되며 이 밴드 값을 DN이라고 한다. DN값은 아래 그림과 같이 같은 영역에 대해서 거의 동일한 값을 가지며 정확하게 같은 위치에 있는 경우는 같은 값은 가진다. 본 실험에서는 타겟점의 DN값을 같은 방식으로 측정한 적외선 비접촉 온도계의 결과와 비교하기 위하여 타겟점의 DN값을 추출하였다(Table 3).



(a) (b) (c)

Fig. 7. Thermal images in same spot

Table 2. Fig. 7's thermal image name and DN value

	(a)	(b)	(c)
image name	DJI_0101	DJI_0103	DJI_0105
DN value	7917	7918	7916

Table 3. DN value of Target site

	target material	sun/shade	DN value
1	wood	sun	8073
2	silicon carbide(white)	sun	7813
3	silicon carbide(black)	sun	7957
4	cast iron, strong oxidation	sun	7646
5	asphalt, pavement	sun	8007
6	silicon carbide(white)	shade	7485
7	silicon carbide(black)	shade	7524
8	cast iron	shade	7441

3.3 타겟점의 온도 측정

타겟점의 온도는 표면 접촉 온도계를 사용하여 측정하였으며, 비접촉 온도계의 경우, 5cm 및 50cm 간격에서 각각 측정하였다(Table 4). Fig. 8는 타겟점의 측정 온도를 그래프로 나타낸 것으로 적외선 비접촉 온도계를 5cm, 50cm 간격을 두고 측정한 값을 각각 흰 막대와 빨간색 표시, 검은 막대와 파란색 표시 그래프로 나타내었다. 또, 표면 접촉 온도계로 측정한 온도 값을 보라색 온도 표시와 보라색 선형 그래프로 나타내어 비접촉 온도계의 측정값과 비교하였다. 그래프에서 알 수 있듯이 비접촉 온도계의 경우 5cm 거리에서 측정한 값이 50cm 거리에서 측정한 값보다 전체적으로 높은 온도였다. 화강암(탄화규소로 포장)은 흰색과 검은색 두 가지 경우에서, 그리고 햇빛과 그늘에서 각각 온도를 측정하였는데, 햇빛에서는 높은 방사율을 보이는 흰색 화강암(탄화규소로 포장)이 검은색 화강암(탄화규소로 포장)보다 실제 표면 온도와 근접한 결과를 보였다. 반면 그늘에서의 화강암(탄화규소로 포장)은 색상과 관계없이 비슷한 온도 결과를 나타내었다. 이처럼 방사율은 적외선 영역에서 실제 표면 온도를 알기 위하여 필수적으로 고려해야 하며, 방사율이 높을수록 실제 표면 온도와 유사한 값을, 방사율이 낮을수록 실제 표면 온도와 차이가 있는 값을 가진다. 따라서 본 실험에서는 측정된 비접촉 온도계의 값을 방사율을 고려한 온도로 변환한 값과 DN값의 상관관계, 그리고 방사율을 고려하지 않은 온도와 DN값의 상관관계를 비교 및 분석하였다. 또, 선행 연구사례에서 제

시되었던 흑체 온도 값과 DN값의 상관관계 그래프와 비교를 추가 진행하였다.

Table 4. Target temperature (unit : ℃)

	sun / shade	target material	non-contact temperature (5cm)	non-contact temperature (50cm)	contact temperature
1	sun	wood	56.7	56.1	42.8
2	sun	silicon carbide(white)	48.2	47.5	45.4
3	sun	silicon carbide(black)	57.3	57.1	51.1
4	sun	cast iron	40.1	39.4	40.8
5	sun	asphalt, pavement	54.1	54.0	50.1
6	shade	silicon carbide(white)	27.6	27.4	32.1
7	shade	silicon carbide(black)	27.6	27.4	31.6
8	shade	cast iron	27.4	26.9	31.7

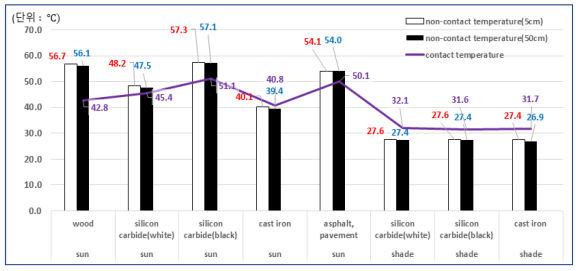


Fig. 8. Target temperature graph (unit : ℃)

3.4 실제 표면 온도와 방사율 조정 전과 후의 비교

Table 5는 방사율을 조정 하기 전과 후, 그리고 실제 표면 온도를 비교한 표이다. 여기서, 방사율을 조정하기 전 값(a)는 5cm와 50cm에서 측정한 비접촉 온도의 평균값이며, 방사율을 조정한 값(c)는 DN값을 T-Linear방법을 사용하여 섭씨온도로 변환한 값이다. 또, (d)는 (a)의 각각에 재질에 맞게 방사율 표의 값을 넣어 조정한 값이다. 이 중, 방사 보정 전(a)과 후(d)의 값과 접촉 온도(e) 차이의 절대값 평균을 계산한 결과, 방사율 보정 전(a)일 때 5.05℃, 방사율 보정 후(d)일 때 3.47℃의 결과가 나타났다. 따라서 방사율 보정 전의 온도 값보다 방사율 보정 후의 온도 값에서 접촉 온도와 더 가까운 값을 보였으며 이는 방사율을 보정하였을 때가 그렇지 않을 때보다 실제 표면 온도의 참값에 가까운 값을 가진다는 것을 의미한다. 또, 같은 방법으로 (c)와 (d)를 비교하였을 때, (c)는 5.8625℃로 각각 방사율을 조정한 (d)보다 실제 표면 온도에 더 차이난 결과를 보였다. 이것은 방사율을 일괄적으로 조절하기보다 각각 따로 조정할 경우 방사율 보정의 정확도를 더 높일 수 있다는 것을 의미한다.

3.5 실제 표면 온도와 DN값의 비교

우선 타겟점의 실제 표면 온도와 DN값을 이용하여 상관관계를 분석해 보았다(Fig. 9). 그래프의 빨간 점은 Table 4의 실제 표면 온도를 표시한 값이며, 노란 선은 이 값의 추세선이다. 본 실험에서 실제 표면 온도와 DN값의 관계식은 Eq. (14)과 같고, 잔차의 노름은 10.039이다. Fig. 9의 경우, 접촉 온도와 DN값과의 관계성을 보기 위한 그래프로 실제 표면 온도를 측정한 접촉 온도를 가로축으로, 열화상 이미지의 DN값을 세로축으로 작성한 그래프다.

Table 5. Before and after radiation adjustment and actual surface temperature

material number	non-contact temperature(℃)(a)	DN(b)	T-Linear adjustment(℃)(c)	radiation adjustment temperature(℃)(d)	contact temperature(℃)(e)
1	56.4	8073	49.77	46.04082	42.8
2	47.85	7813	39.37	46.3852	45.4
3	57.2	7957	45.13	49.61224	51.1
4	39.75	7646	32.69	38.53316	40.8
5	54.05	8007	47.13	51.29235	50.1
6	27.5	7485	26.25	26.65816	32.1
7	27.5	7524	27.81	23.85204	31.6
8	27.15	7441	24.49	26.31888	31.7
Average of absolute value (measureing temperature – contact temperature(e))					
	5.05		5.8625	3.4680	0

$$Contact\ temperature = 0.028 \times DN - 179.69 \quad (14)$$

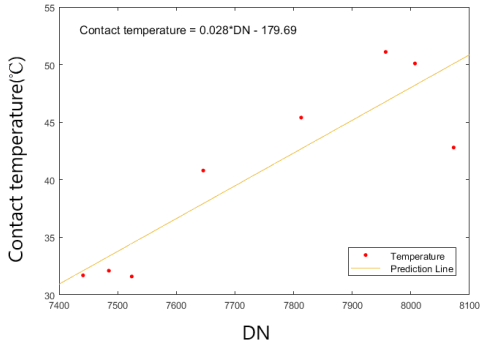


Fig. 9. Relationship between contact temperature and DNs

3.6 방사 조정된 열화상 온도와 DN값의 비교

다음으로, 적외선 비접촉 열화상 온도계로 측정한 온도를 방사율을 고려하여 계산한 온도 값과 DN값의 상관관계를 그래프로 나타내었다(Fig. 10). Fig. 10에서 목재, 화강암(탄화규소로 포장), 주철, 포장된 아스팔트의 방사율은 각각 0.80, 0.95(흰) 및 0.85(검), 0.95, 0.93으로 계산되었다. 비접촉 온도계로 측정하고 방사 조정한 값과 DN값의 관계식은 아래 Eq. (15)와 같이 나타났으며 잔차의 노름은 10.931이다. 이는 Kelly *et al.* (2019)가 유도한 흑체 복사 에너지식과 유사하며, T-linear 데이터 변환식과 비교했을 때에도 유사한 결과를 보인다.

$$Radiation\ adjustment\ temperature = 0.042 \times DN - 287.59 \quad (15)$$

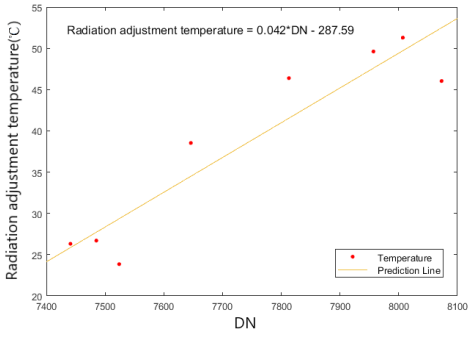


Fig. 10. Relationship between radiation adjustment temperature and DNs

4. 결 론

본 논문에서는 열 영상의 처리 과정에서 생성되는 DN값을 실제 표면 온도로 변환하기 위하여 필수적으로 진행해야 하는 방사율과 DN값의 관계성 분석 연구를 진행하였다. 이를 위하여 DN값을 얻는 과정에서 사용되는 열화상 카메라와 같은 원리로 작용하는 적외선 비접촉 열화상 온도계를 이용하였으며 실제 온도와의 관계성을 알아보기 위하여 실제 표면 온도를 측정할 수 있는 접촉 온도계를 함께 사용하였다. 또, 기존의 T-Linear 데이터 변환 수식과 본 연구의 결과를 비교하여 두 결과에서 기울기 및 상수를 비교하고 분석하였다. 우선, 비접촉 온도계를 사용하여 측정한 온도에 대해서 T-Linear 변환식을 이용하여 실제 표면 온도와 차이를 절댓값으로 비교하였을 때 평균 5.8625℃로 나타났다. 반면, 비접촉 온도계를 사용한 측정 온도를 방사율을 고려하여 보정하였을 경우 절댓값 평균이 3.4680℃로 나타났다. 따라서, 방사율이 고려된 열화상 온도가 그렇지 않은 경우보다 실제 표면 온도에 더 가까운 결과를 보였다. 또, T-Linear 방법을 이용하여 DN값을 온도로 변환하였을 때보다 각각의 방사율이 고려된 경우의 열화상 온도가 실제 표면 온도와 더 가까웠다. 따라서 본 논문에서는 DN값을 실제 표면 온도로 변환하는 것에 있어서 방사율을 고려하는 것이 그렇지 않은 경우보다 더 실제 온도와 가까운 값을 보이며, 방사율이 고려된 경우 DN값과의 관계에서 선형에 더 가까운 값을 얻을 수 있다는 결론을 도출할 수 있었다. 하지만 본 실험에서는 일정한 기준을 가진 환경 온도에서 측정된 온도 값이 아니며 방사율만을 고려한 실험을 진행하여 높은 정확도의 결과를 얻는 것에는 한계가 있었다. 그러므로 향후 열 영상 처리 과정에서 방사율뿐만 아니라 다른 환경 요소에 따른 온도 보정이 진행된다면 DN값을 선형식을 사용한 실제 표면 온도로 변환하여 열 영상에서 섭씨온도 값을 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단의 지원으로 수행되었습니다 (NRF-2019R1I1A3A01062109).

References

Bae, J., Lee, J., Jang, A., and Ju, Y.K. (2019). SMART SKY EYE system for structural safety assessment using drones and thermal images. *Journal of The Korean Association for Spatial Structures*, Vol. 19, No. 3, pp. 4-8.

FLIR. (2014). Advanced Radiometry Application Note;

FLIR: Wilsonville, OR, USA.

FLIR. (2016). For R&D Professionals Infrared Thermal Imaging Handbook. FLIR.

FLIR. (2013). User Guide(Flir Ex series). FLIR

Ham, G.W., Lee, J.M., Bae, K.H., and Park, H.G. (2019). A study on agricultural drought monitoring using drone thermal and hyperspectral sensor. *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 22, No. 3, 107-119. (in Korean with English abstract)

Hwang, S.K. (2020). *Development of UAV-aided Laser Thermography System for Visualizing Invisible Coating Defects in Steel Structures,* PhD Dissertation, KAIST, Daejoen, Korea, 100p.

Jung, J.Y., Yoon, H.J., Cho, H.W., and Yang, H.S. (2018). A study on temperature characteristics of various depth using infrared thermography. *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 19, No. 3, pp. 83-89.

Kelly, J., Kljun, N., Olsson, P.O., Mihai, L., Liljeblad, B., Weslien, P., and Eklundh, L. (2019). Challenges and best practices for deriving temperature data from an uncalibrated UAV thermal infrared camera. *Remote Sensing,* Vol. 11, No. 5, pp. 567.

Kuenzer, C. and Dech, S. (2013). Theoretical background of thermal infrared remote sensing. In Thermal Infrared Remote Sensing, pp. 1-26. Springer, Dordrecht.

Lee, E.J., Shin, S.Y., Ko, B.C., and Chang, C. (2016). Early sinkhole detection using a drone-based thermal camera and image processing. *Infrared Physics & Technology,* Vol. 78, pp. 223-232. (in Korean with English abstract)

Lee, J.G., Ryu, Y.C., Kim, Y.H., Choi, W., and Kim, H.J. (2018). Drone infrared thermography method for leakage inspection of reservoir embankment. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers,* Vol. 60, No. 6, pp. 21-31. (in Korean with English abstract)

Muntwyler, U., Schuepbach, E., and Lanz, M. (2015). Infrared (IR) drone for quick and cheap PV inspection. *In Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*. pp. 1804-1806.

Zheng, H., Zhong, X., Yan, J., Zhao, L., and Wang, X. (2020). A thermal performance detection method for building envelope based on 3D model generated by UAV thermal imagery. *Energies,* Vol. 13, No. 24, pp. 6677.