

# 표적은폐도구의 유용도 평가를 위한 적외선화상 모사

정진수\* · 고상근\*\* · 유호선\*\*\*  
(1999년 1월 8일 접수)

## Infrared Image Simulation for Estimating the Effectiveness of Camouflage Measures

Jinsoo Jung, S. Ken Kauh and Hoseon Yoo

**Key Words:** Apparent Temperature(겉보기온도), Longwave Emissivity(장파복사방사율), Infrared Image(적외선화상), Camouflage Measures(표적은폐도구)

### Abstract

Camouflage measures in military purpose utilize the apparent temperature difference between target and background, so it is essential to develop a thermal analysis program for apparent temperature predictions and to apply some camouflage measures to real military targets for camouflage purpose. In this study, a thermal analysis program including conduction, convection and radiation is developed and the validity of radiation heat transfer terms is examined. The results show that longwave radiation along with solar radiation should be included in order to predict the apparent temperature as well as the physical temperature precisely. Longwave emissivity variation as an effective camouflage measures is applied to a real M2 tank. From the simulation results, it is found that an effective surface treatment, such as painting of a less emissive material or camouflage clothing, may provide a temperature similarity or a spatial similarity, resulting in an effective camouflage.

### 기호설명

$A$	: 면적 [ $m^2$ ]	$I_r$	: 임의의 열영역에 대한 태양복사 반사 성분 [ $W/m^2$ ]
$B$	: 복사교환계수	$k$	: 열전도율 [ $W/m \cdot K$ ]
$C$	: 유효컨덕턴스 [ $W/K$ ]	$l$	: 열영역외 기하학적 중심에서 공통접 축면적까지의 거리 [ $m$ ]
$C_1$	: 스펙트럴출사량 $N$ 의 제 1 복사상수, $3.742 \times 10^8 W \cdot \mu m^4/m^2$	$L$	: 출사량 [ $W/m^2 \cdot sr$ ]
$C_2$	: 스펙트럴출사량 $N$ 의 제 2 복사상수, $1.439 \times 10^4 \mu m \cdot K$	$M$	: 질량 [ $kg$ ]
$CAP$	: 열용량 [ $J/K$ ]	$N$	: 스펙트럴출사량 [ $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ ]
$C_p$	: 비열 [ $J/kg \cdot K$ ]	$q_{i,aa}$	: 열영역에 직접 도달하는 태양복사에 의한 열량 [ $W/m^2$ ]
$F$	: 형상계수	$Q$	: 열량 [ $W$ ]
$h$	: 대류열전달계수 [ $W/m^2 \cdot K$ ]	$r$	: 열영역의 총갯수
$I_d$	: 임의외 열영역에 대한 태양복사 직사 성분 [ $W/m^2$ ]	$STAB$	: 안정성 상수
$I_{dt}$	: 임의외 열영역에 대한 태양복사 확산 성분 [ $W/m^2$ ]	$t$	: 시간 [ $s$ ]
		$T$	: 온도 [ $K$ ]
		$x$	: $x$ 방향 좌표

\* 서울대학교 대학원 기계공학과

\*\* 회원, 서울대학교 기계공학과

\*\*\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

- y : y 방향 좌표
- z : z 방향 좌표

그리스문자

- $\alpha$  : 태양복사흡수율
- $\epsilon$  : 방사율
- $\lambda$  : 파장 [ $\mu\text{m}$ ]
- $\pi$  : 원주율
- $\sigma$  : 스테판 볼츠만 상수,  $5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
- $\eta$  : 표적은폐도구 유용도

하첨자

- app : 겉보기온도
- c : 공통접촉면적
- emit : 자체 방사에 의한 출사량
- gnd : 장파복사 계산시의 지형
- i : 임의의 열영역
- imp : 임의의 열영역 i에 부여되는 열량
- j : 임의의 열영역
- o : 열영역의 대류경계 표면적
- p : 태양복사 계산시의 투영면적
- phy : 물리적 온도
- ref-long : 장파복사의 반사에 의한 출사량
- ref-sun : 태양복사의 다중반사에 의한 출사량
- sky : 천공온도
- solar : 태양복사에 의한 열량
- sun : 흑체로 가정했을 때의 태양온도

1. 서론

적외선 센서는 대부분 화상장비로서 물체가 지니는 특정한 파장영역내의 복사에너지를 이용하여 물체를 탐지하며 이를 통해 군사적인 응용으로서 표적의 존재 유무 및 표적의 확인 등이 가능하도록 도와준다. 군사적으로 볼 때 탐지 및 포착의 목표인 표적은 특정한 배경(background)에 위치해 있으며 그 배경 하에 놓여있는 표적을 적외선화상장비를 이용하여 탐지하고자 할 때 성공여부는 화상장비의 성능, 적외선복사의 대기무과 및 물체와 배경간의 복사대조(radiation contrast)에 의해 결정된다.

일반적으로 아군의 입장에서는 적군의 표적을 탐지하고 포착하는 것이 중요하지만 반대로 적군으로부터 아군의 표적이 탐지되는 것을 방해하는 것도 그만큼 중요하다. 표적이 탐지되는 것을 방지하기 위해서는 표적 자체나 표적 근처에 인위적인 조작을 가하여 배경과 매우 유사한 특성을 생성해야 하며 이런 목적을 위해 표적은폐도구(camouflage measures)를 대부분 적용하고 있는데 그 기종은 크게 두 가지로 분류된다.<sup>(1)</sup> 첫번째는 온도유사성(temperature similarity)으로서 표적의 겉보기온도(apparent temperature)를 배경의 겉보기온도의 범위에 매우 근접한 범위로 옮길 수 있어야 하며 가능하다면 배경의 겉보기온도 범위 내로 이동시킬 수 있어야 한다. 두번째는 공간유사성(spatial similarity)으로서 적외선화상에서 표적내의 겉보기온도 분포가 해당 배경의 겉보기온도 분포와 유사하도록 하여야 한다. 표적의 존재 유무를 알기 위해서는 공간유사성보다는 온도유사성이 더 중요하고 반대로 표적에 대한 정확한 파악(recognition)이 목적일 경우에는 공간유사성이 중요한 문제로 대두된다.

표적은폐도구의 유용도(effectiveness)를 파악하기 위해서는 최종적으로 화면으로 나타나는 적외선화상을 이용하게 된다. Hecker<sup>(2)</sup>와 Walker 등<sup>(3)</sup>은 실제 적외선화상을 실험을 통해 획득한 후, 그 적외선화상의 배경으로부터 해당 표적을 도출하는 과정 및 방법을 제안하였는데, 적외선화상에 존재하는 배경으로부터 표적의 특징을 뽑아내어 결국 표적을 확인하는 과정에 초점을 맞추었으며 표적은폐도구에 대한 언급은 없다. 한편, Kleindienst 등<sup>(4)</sup>은 표적은폐용 스모크를 표적에 적용하였을 때 표적의 탐지에 미치는 영향을 고찰하였다. 다양한 스모크에 대한 실험을 통해 스모크의 영향을 파악하였으며 적외선화상에 영향을 미치는 여러 인자들의 값들을 정량화하였다. Meitzler 등<sup>(5)</sup>은 실제 군사 표적을 포함한 적외선화상에 대한 통계적인 해석을 통해 적외선화상내에 존재하는 표적과 배경의 처리 등에 관한 연구를 수행하였다.

위에서 살펴본 바와 같이 군사적 표적에 대한 연구는 실제 적외선화상을 획득한 후의 처리과정에 대한 것이 대부분이며 또한 실제 표적에 대한 실험을 통해 적외선화상을 구하였다. 실험에 의한 방법은 가장 신뢰성 있는 자료를 제공하지만,

비용이 과다하고 실험 자체도 용이하지 않다. 반면에 컴퓨터에 의한 모사는 적절한 형상생성기법 및 열전달기구의 모델링에 의한 열해석 프로그램을 통하여 실험보다 용이하게 결과를 예측할 수 있을 뿐만 아니라 표적은폐도구의 유용도를 보다 간단하게 확인할 수 있다.

본 연구에서는 표적에 작용하는 여러 형태의 열전달 메카니즘에 대한 모델링을 수행하고, 이를 구현할 수 있는 해석 프로그램을 개발하며 실제의 군사용 전차에 적용하여 복사 특성을 정성적으로 파악하고자 한다. 또한, 실제 표적에 표적은폐방법을 적용하여 얻을 수 있는 적외선화상의 예측을 통하여 표적은폐도구의 유용도를 평가하고자 한다.

## 2. 해석

### 2.1 해석대상 시스템

군사적인 관점에서 볼 때 적외선화상을 이용한 탐지 대상은 지상 표적, 해상 표적 및 항공 표적 등으로 나뉘며 표적의 종류에 따라 관련되는 열전달량 및 해석 방법이 차이를 보인다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같은, 지상 표적의 대표적 예인 M2 전차를 대상으로 해석을 수행하였으며 표적은폐도구의 유용도 해석을 위해 그림에 표시된 바와 같이 왼쪽 바퀴열 중 가운데 바퀴를 기준으로 하여 자료를 처리하였다. 전차의 경우 표면온도에 영향을 미치는 열전달기구는 다양하지만 이들 모두를 해석에 고려하는 것은 거의 불가능하며 실효성도 의문시된다. 따라서 여기서는 대표

적으로 전도, 대류, 태양복사 및 장파복사를 해석 대상으로 취하였으며 각각에 대한 모델링 및 이들 사이의 상호작용을 포괄하는 열해석 프로그램 개발을 통하여 연구를 수행하였다. 열해석방법으로는 열영역(thermal region)에 기초한 열등가회로법을 사용하였다.

### 2.2 열등가회로법과 CAD의 결합

열등가회로법에 의한 열해석방법은 매우 복잡한 형상을 해석하는데 매우 적합하며 열영역에 기초한 방법이다. 열영역은 열해석 대상체에서 물성치가 같고 온도구배가 크지 않아서 하나의 대표온도로 그 영역의 온도를 부여할 수 있는 부분을 의미한다. 전차의 경우 여러 개의 열영역으로 분할할 수 있는데, 임의의 열영역  $i$ 에 대해 열용량(thermal capacitance) 및 그 열영역으로의 열출입을 고려하면 아래의 식 (1)과 같이 간단하게 표현할 수 있다.

$$\sum Q_i = M_i \cdot C_{p,i} \left( \frac{dT_i}{dt} \right) \quad (1)$$

유효컨덕턴스(effective conductance)  $C_{\#}$ 를 도입하면 전도, 대류 및 장파복사에 대한 열전달량은 식 (2)와 같다.

$$Q_{\#} = C_{\#}(T_j - T_i) \quad (2)$$

수식의 간편화를 위해 열용량 및 안정성 상수를  $CAP_i = M_i \cdot C_{p,i}$ ,  $STAB_i = \frac{\Delta t}{CAP_i} \sum_{\#} C_{\#}$ 로 정의하고<sup>(6)</sup> 식을 정리하면 구하고자 하는 온도  $T'_i$ 는 다음과 같다.

$$T'_i = \frac{\left[ \sum_{\#} C_{\#} T_j + \sum_{\#} C_{\#} T'_j + 2Q_{i, imp} \right]}{\sum_{\#} C_{\#} \left( 1 + \frac{2}{STAB_i} \right)} - \frac{T_i \sum_{\#} C_{\#} \left( 1 - \frac{2}{STAB_i} \right)}{\sum_{\#} C_{\#} \left( 1 + \frac{2}{STAB_i} \right)} \quad (3)$$

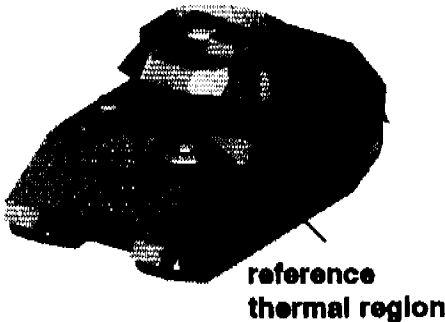


Fig. 1 M2 tank for infrared image simulation.

여기서,  $Q_{i,imp}$  는 열영역의 온도  $T_i$  와는 무관하게 주어지는 열량을 나타내는데, 해당 열영역에서 발생하는 발열량 및 태양복사에 의한 열량이 여기에 해당된다. 미지 온도가 서로 연계되어 있으므로 반복 계산법에 의해 온도를 계산하게 된다.

전술한 바와 같이 열해석대상체는 많은 열영역으로 구성되어 있다. 형상이 간단할 경우에는 열영역간에 발생하는 열전달 즉, 전도 열전달을 쉽게 계산할 수 있지만 형상이 매우 복잡하면 수동으로 계산하는 것이 사실상 불가능하다. 본 연구에서는 FRED(Faceted Region Editor)를 이용하여 열영역을 생성하고 전도열전달에 관계되는 전도 유효컨덕턴스를 자동으로 계산하였다. 우선 열영역에 물성치를 부여하고 FRED에서 제공되는 그래픽 기능을 통해 전도유효컨덕턴스에 관계되는 기하학적 인자를 계산하면 다음과 같이 전도유효컨덕턴스를 계산할 수 있다.<sup>(7)</sup>

$$C_H = \frac{A_{i,c}}{\frac{l_i}{k_i} + \frac{l_j}{k_j}} \quad (4)$$

전차의 경우 경계조건으로 시간에 따른 여러 열량이 주어지고 최종적으로 전도 문제로 귀착되는데 이런 자동 계산 과정을 통해 좀 더 쉽게

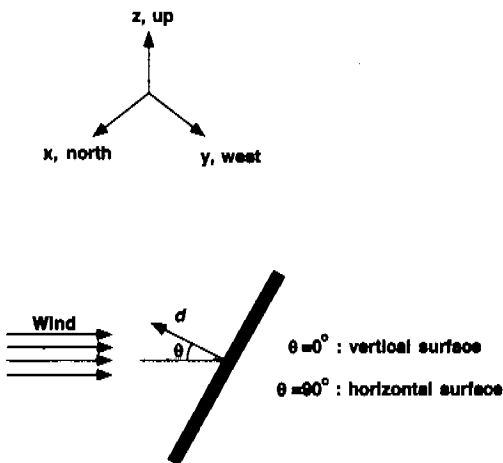


Fig. 2 Coordinate system and slanted surface geometry for heat transfer coefficient calculation.

열해석을 수행할 수 있다.

### 2.3 대류열전달

외부에 놓인 전차의 경우 외부 대기와 절대 풍속 및 바람 방향 등에 의한 대류열전달이 큰 영향을 미친다. 대류열전달에 대한 유효컨덕턴스는 다음과 같이 표현된다.

$$C_H = hA_{i,o} \quad (5)$$

외부 대기와 접촉하는 면적  $A_{i,o}$  는 FRED의 그래픽 기능을 통해 계산이 가능하며 결국 대류열전달계수의 결정을 통해 대류에 의한 열전달량을 계산할 수 있다. Jacobs<sup>(8)</sup>는 가장 기본적인 형상인 직육면체에 대해 직접적인 실험을 통해 대류열전달계수를 측정하였다. Jacobs는 실험 결과를 종합하여 각각 수직면일 경우와 수평면일 경우에 대한 열전달계수 상관식을 제안하였고 특히 수직면에 대해서는 바람이 면에 대해 불어들어오는 경우(windward)와 그 반대의 경우(leeward)로 나누어 결과를 해석하였다.

실제로 형상이 복잡한 표적의 경우 대부분의 면은 수평면이나 수직면이 아니고 일반적으로 Fig. 2에 도시된 바와 같이 바람의 방향에 대해  $\theta$ 만큼 기울어진 형상을 갖게 된다. 이런 기울어진 면에 대해 대류열전달계수를 계산하기 위해서는 바람의 성분을 그 면에 수직인 성분과 수평한 성분으로 나누는 후 이에 대한 결과를 적절히 조합하여 대류열전달계수를 구해야 한다. 수직성분 및 수평성분은 해당 표면의 법선 벡터를 이용하여 쉽게 계산 가능하고 이를 이용하여 각각의 대류열전달계수도 쉽게 계산할 수 있다. 자세한 계산 과정의 계통도를 Fig. 3 및 Fig. 4에 나타내었는데, 여기서  $snorm_x$ ,  $snorm_y$ ,  $snorm_z$ 는 각각 면의 법선벡터의 x, y, z 성분을 나타낸다.

각각의 바람성분을 통해 수직성분 대류열전달계수와 수평성분 대류열전달계수를 계산하게 되면 적절한 조합을 통해 대류열전달계수를 결정해야 한다. 본 연구에서는 Patankar<sup>(9)</sup>의 연구를 참고로 하여 각도가 45°일 때 산술평균이 아닌 조화평균으로 계산하였다. 이런 과정을 통해 계산되는 통합 대류열전달계수와 각도에 따른 변화를 알아보기 위하여 속도가 2m/s이고 바람 방향이

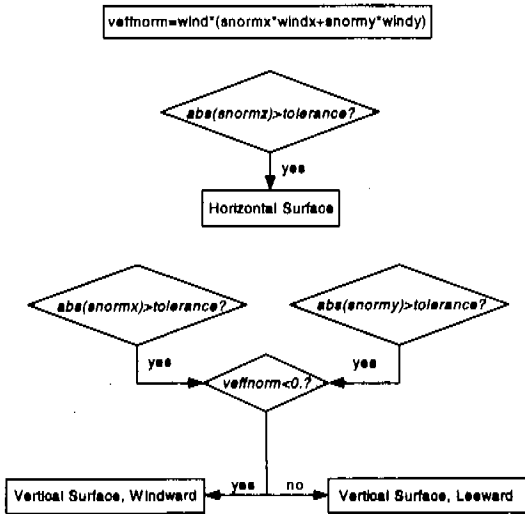


Fig. 3 Heat transfer coefficient calculation algorithm I.

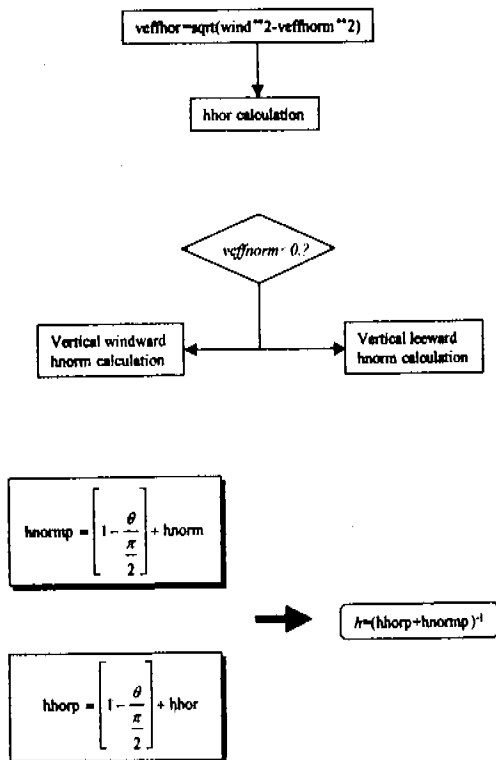


Fig. 4 Heat transfer coefficient calculation algorithm II.

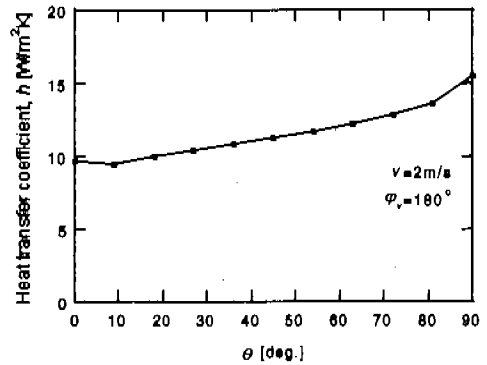


Fig. 5 A typical example of heat transfer coefficient variation with slanted angle  $\theta$ .

180°일 때 각도를 변화시켜 가면서 변화되는 대류열전달계수를 Fig. 5에 도시하였다. 전반적으로 수평면일 경우 열전달계수값이 가장 크고 수직면일 때 가장 작은 경향을 보인다. 이렇게 계산되는 대류열전달계수는 표적의 모든 표면에 대한 법선벡터의 정보와 결합되어 전차 열해석에 쉽게 쓰일 수 있다.

2.4 장파복사열전달

본 연구에서는 적외선파장영역을 8-12μm로 설정하였는데 이 파장영역은 장파복사(longwave radiation)영역에 속한다. 만약 표적이 단순한 수평면이라면 이 표적과 장파복사를 교환하는 대상은 천공반구(sky-hemisphere)이다. 천공반구는 적절한 거리에서 겉보기온도  $T_{sky}$ 를 갖는 고체흑체막(solid blackbody screen)을 나타낸다. 이와 달리 표적이 수직면이라면 천공 및 지형(terrain)과 장파복사를 교환한다. 일반적으로 전차와 같이 복잡한 형상을 지닌 물체표면은 수평면이나 수직면이 아니며 또한 면과 면사이의 다중반사에 의한 장파복사도 고려해야 하는데 이 계산 또한 형상의 복잡성으로 인해 간단하지가 않다. 본 연구에서는 장파복사 계산을 위해 형상계수(view factor) 대신 복사교환계수(radiation exchange factor)  $B_{ij}$ 를 도입하였으며 이 때 장파복사에 대한 유효컨덕턴스는 다음과 같다.

$$C_H = \sigma B_{ij} \epsilon_i A_i (T_i^2 + T_j^2) (T_i + T_j) \quad (6)$$

여기서  $B_{ij}$ 를 제외한 다른 항은 프로그램 내에서 주어지거나 알고 있는 값들이며 복사교환계수  $B_{ij}$ 는 FRED를 통해 계산할 수 있다. 장파복사 계산을 위해서는 천공온도(sky temperature) 및 지형온도(terrain temperature) 등을 계산해야 하는데 장파복사에 관련된 인자들의 자세한 계산과정은 정진수 등<sup>(10)</sup>을 참조하기 바란다.

2.5 태양복사열전달

태양복사에 의한 열전달량은 전도, 대류 및 장파복사와는 달리 해당 열영역의 온도에 무관하게 주어지는 열량이다. Atwater 등<sup>(11)</sup>은 기존 연구자의 연구를 종합하여 구름에 의한 태양복사 감소까지 계산할 수 있는 태양복사 계산식을 제안하였다. 본 연구에서는 Atwater등의 결과를 이용하여 태양복사를 계산하였고 이 때 태양고도를 계산하기 위한 여러 가지 인자는 Iqbal<sup>(12)</sup>을 참조하였다. 임의의 열영역  $i$ 에 도달하는 태양복사 성분은 각각 직사성분(direct component), 확산성분(diffused component) 및 지형으로부터의 반사성분(reflected component)으로 구성되며 수식으로 표현하면 식 (7)과 같다. 여기서  $q_{i,ss}$ 는 태양복사흡수율에 의한 태양복사의 흡수 및 다른 열영역으로부터의 반사를 고려하지 않은 양이므로 이를 고려하여 정리하면 태양복사에 의한 열영역으로의 최종적인 열량은 식 (8)과 같이 계산된다. 여기서  $A_i$ 는 열영역  $i$ 의 면적,  $A_{i,p}$ 는 직사성분에 수직인  $A_i$ 의 면적을 나타내고  $F_{sky}$ 와  $F_{gnd}$ 는 각각 천공과 지형에 대한 형상계수를 의미한다.

$$q_{i,ss} = \frac{1}{A_i} [A_{i,p} I_d + A_i (F_{sky} I_{diff} + F_{gnd} I_r)] \tag{7}$$

$$Q_{i,solar} = [\alpha A_i q_{i,ss} + \sum_{j=1}^n (B_{ji} (1 - \alpha_j) A_j q_{j,ss})] \tag{8}$$

2.6 물리적 온도 및 겉보기온도

어느 특정 온도의 흑체에서 나오는 전체 출사량(radiance)과 어느 회체에서 방사 및 반사를 통해 나오는 전체 출사량이 같으면 적외선 열상장

비는 두 물체를 구별할 수 없다. 이 때, 두 물체의 겉보기출사량(apparent radiance)은 같고, 겉보기온도(apparent temperature)는 그 흑체의 특정 온도가 된다. 겉보기온도를 계산하기 위해서는 우선 전체 출사량을 계산해야 하며 전체 출사량이 계산되면 흑체라는 조건을 이용하여 겉보기온도를 계산할 수 있다. 흑체의 경우 스펙트럴출사량  $N(\lambda, T)$ 는 플랑크분포(Planck distribution)로 주어지며 다음과 같다.

$$N(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \lambda^{-5} (\exp(C_2/\lambda T) - 1)^{-1} \tag{9}$$

위 식을 8-12 $\mu$ m의 파장영역에 대해 적분하면 특정 온도에 해당하는 전체 출사량  $L$ 을 계산할 수 있고 열상장비는 이 양을 측정하게 된다. 전술한 바와 같이 회체의 경우 흑체와는 달리 반사가 존재하기 때문에, 회체에서 나오는 전체 출사량은 자체방사에 의한 출사량, 장파복사의 반사에 의한 출사량 및 태양복사의 반사에 의한 출사량으로 구성된다. 회체에 대한 전체 출사량을 임의의 열영역(thermal region)  $i$ 에 대해 수식으로 표현하면 식 (10)과 같다.

$$L_i = L_{i,emit} + L_{i,ref-long} + L_{i,ref-sun} \tag{10}$$

식 (10)의 우변에 있는 각각의 항들에 대한 정확한 유도는 정진수 등<sup>(10)</sup>을 참조하기 바람이며 여기서는 그 결과만을 간략히 나타내기로 한다.

$$L_{i,emit} = \epsilon_i L_{i,b} \tag{11}$$

$$L_{i,ref-long} = (1 - \epsilon_i) [B_{gnd} L_{gnd} + B_{sky} L_{sky} + \sum_{j=1}^n B_{ij} L_{j,b}] \tag{12}$$

$$L_{i,ref-sun} = (1 - \epsilon_i) q_{i,ss} \frac{\int_8^{12} N(\lambda, T_{sun}) d\lambda}{\sigma T_{sun}^4} \tag{13}$$

위의 세 식에 의해 각각의 출사량을 계산하면 전체 출사량이 계산되고 흑체 조건을 이용하면 거꾸로 겉보기온도를 쉽게 계산할 수 있다.

### 3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 실제 군사용 지상 표적인 M2 전차를 대상으로 열해석을 수행하였으며 모사시간은 08시부터 24시이다. 모사를 위해서는 모사시간 및 지리적인 위치에 대한 정보가 필요한데 그 변수들은 Table 1에 나타난 바와 같다. 날씨 변수는 서로 복합적으로 연관되어 있기 때문에 임의의 값을 사용할 수 없으며 특히 대기에 관계되는 자료는 대류열전달에 큰 영향을 미치므로 정확히 측정된 값을 사용하여야 하는데 이를 위해 측정치가 정확히 알려진 위치를 대상으로 하

Table 1 Seasonal and geographical information for the present simulations.

month	day	latitude	longitude	weather
7	19	47.48°N	88.50°W	Clear

여 모사를 수행하였다. 지형 조건은 가장 단순화된 평지<sup>(10)</sup>를 대상으로 하였고 여러 열전달량 중 전도 및 대류열전달은 모든 경우에 대해 포함하였으며 표적온폐도구의 유용도 해석을 중심으로 연구를 수행하였다. 장파복사 및 태양복사에 의한 영향을 알아보기 위하여 Table 2에 나타난 바와 같은 조합을 이용하여 해석을 수행하였다. 전차의 경우 적외선화상장비에 의한 포착 및 탐지의 기준은 바퀴에서 발생하는 열량, 포를 쓴 후에 발생하는 열량, 엔진에서 생성되는 열량 등인데 그 정확한 값들은 알 수 없으므로 전차의 바퀴에 인위적인 열량을 부여하여 주위 배경에 비해 물리적 온도가 높도록 하였다.

태양복사의 영향을 파악하기 위하여 태양복사를 제외한 후 프로그램을 실행하였는데 Fig. 6과 Fig. 7의 비교를 통하여 그 영향을 파악할 수 있다.

절보기온도는 물리적 온도가 결정되면 그로부터 계산이 되기 때문에 여러 열전달기구의 전체

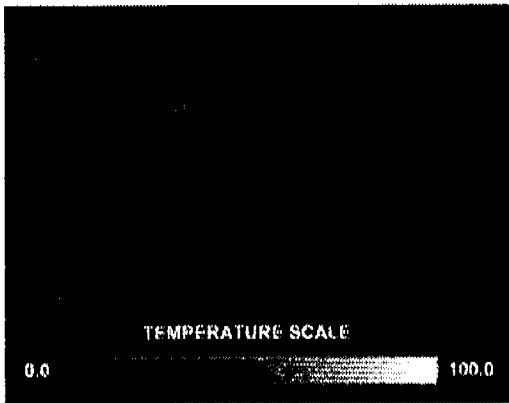


Fig. 6 Physical temperature based image at 12:00 with all heat transfer mechanisms included.

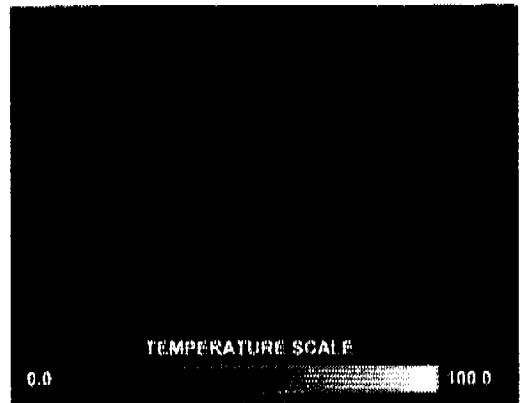


Fig. 7 Physical temperature based image at 12:00 without solar radiation.

Table 2 Combinations of radiation heat transfer mechanisms.

Case	Conduction	Convection	Longwave Radiation	Solar Radiation
Fig. 6	On	On	On(Noon)	On(Noon)
Fig. 7	On	On	On(Noon)	Off
Fig. 8	On	On	Off	On(Noon)
Fig. 9	On	On	On(Midnight)	On(Midnight)
Fig. 10	On	On	Off	On(Midnight)

적인 기여도를 파악하기 위해서 겉보기온도보다는 물리적 온도를 비교, 고찰의 기준으로 취하였다. Fig. 6은 관련된 모든 열전달량을 다 포함하여 실행시킨 결과이며 Fig. 7은 태양복사를 제외한 경우의 결과이다. 바퀴 부분에 주어진 인위적인 열량으로 인해 바퀴부분이 온도가 높을 뿐 전체적으로 보면 태양복사를 제외했을 때 온도가 매우 낮으며 온도예측에 있어 많은 오류를 포함하고 있음을 알 수 있다. 어떤 특정 시간에서의 표적의 온도는 그 전 시간에서의 온도분포를 이용하여 구할 수 있는데 태양복사를 제외하게 되면 전 시간에서의 온도분포가 완전히 물리케 되고 그로 인해 전체적인 온도 이력이 전혀 다른 값을 갖게 되므로 가능하다면 정확한 태양복사 모델링을 통해 열량을 정확히 부여해야 함을 알 수 있다.

태양복사와 장파복사는 복사열전달량으로서 유사한 점을 갖고 있지만 그 특징은 실제로 많이 다를 수 있다. 장파복사를 제외한 후 획득할 수 있는 적외선화상을 Fig. 8에 도시하였다.

태양복사의 경우와는 달리 장파복사 없이 계산을 수행한 경우는 장파복사를 고려한 경우에 비해 전체적으로 온도가 높으며 이로 인해 적외선화상이 매우 밝게 되는 것을 알 수 있다. 이런 결과로 비추어볼 때 물리적 온도가 상당히 영향을 받음을 알 수 있고 실제 표적에 대한 겉보기 온도를 정확히 예측하기 위해서는 장파복사를 반드시 해석 프로그램에 포함시켜야 한다는 사실을 알 수 있다. 장파복사의 영향을 좀더 정확히 확인하기 위하여 태양복사에 의한 영향이 없는 24

에 취득한 적외선화상을 택하여 비교한 결과물 Fig. 9 및 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 8의 결과와 마찬가지로 장파복사를 고려한 Fig. 9에 비해 Fig. 10에서 표적의 온도가 전체적으로 높음을 알 수 있다. 결과적으로 주간 및 야간에 상관없이 장파복사를 포함하지 않으면 실제보다 높은 온도를 예측하게 됨으로써 적외선 파장영역에서의 표적의 특성 파악을 제대로 수행할 수 없음을 알 수 있다. 본 연구에서 장파복사 계산을 위해 복사교환계수를 도입한 후 계산을 수행하였는데 이 결과를 통하여 복사교환계수 도입에 의한 장파복사 계산의 타당성을 확인할 수 있다. 또한, 추가적으로 주간에는 태양복사의 영향이 지배적이며 야간에는 태양복사의 영향이 없기 때문에 장파복사의 영향이 두드러진다는 사실도 확인할 수 있다.

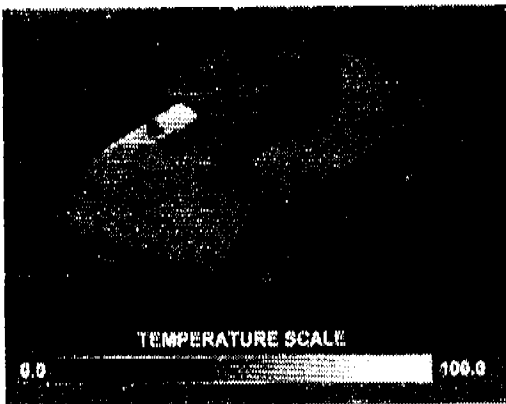


Fig. 8 Physical temperature based image at 12:00 without longwave radiation.

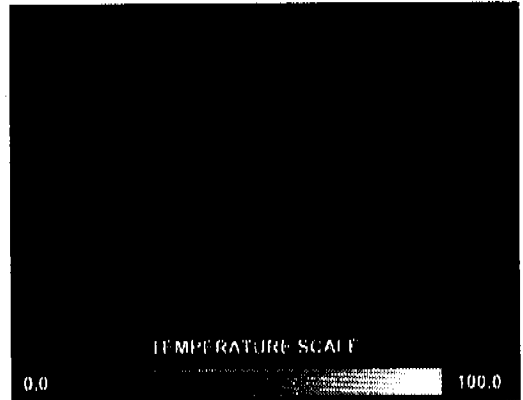


Fig. 9 Physical temperature based image at 24:00 with all heat transfer mechanisms included.

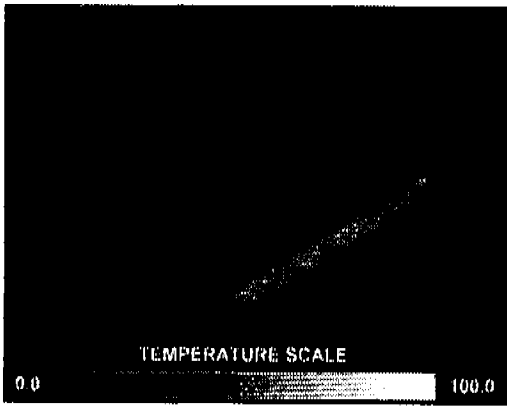


Fig. 10 Physical temperature based image at 24:00 without longwave radiation.

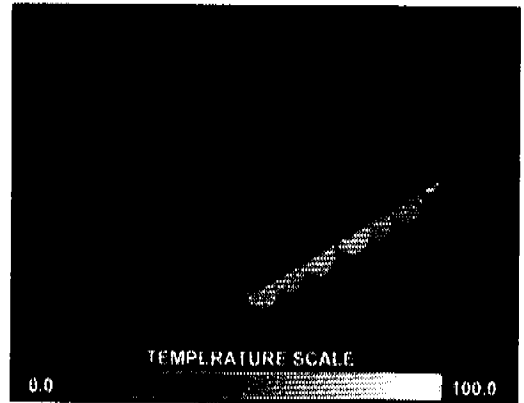


정진수 등<sup>(10)</sup>은 복사특성이 서로 다른 면을 가진 물체에 대해 열해석을 수행하여 방사율이 작은 페인트를 이용한 표적은폐 가능성을 제시하였다. 실제 표적에 대해 그 유용도를 확인하기 위해 전술한 바와 같이 M2 전차의 바퀴 부분에 열량을 가하여 바퀴 부분의 온도가 주위 배경보다 상당히 높게 하였다. 이 때 바퀴부분의 장파복사방사율을 각각 0.94, 0.54, 0.14로 변화시키면서 적외선화상을 구하여 물리적 온도 및 겉보기온도의 거동을 파악하였다. 주로 야간에 표적의 탐지가 이루어지므로 대표적으로 22시를 기준으로 하여 적외선화상을 비교, 검토하였고 앞에서의 결과를 바탕으로 모든 열량을 포함하여 계산하였다. 먼저 장파복사방사율이 0.94일 때 얻어지는 물리적

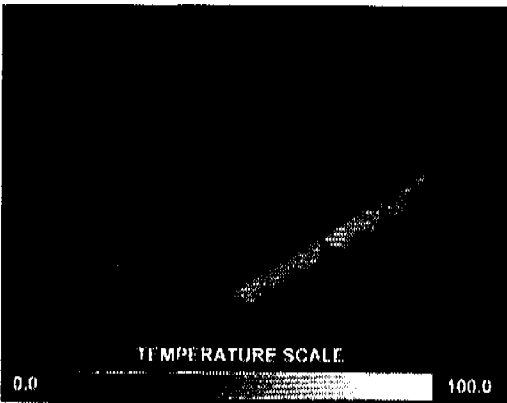
온도와 겉보기온도에 의한 적외선화상을 Fig. 11에 각각 나타내었다. 방사율이 1인 흑체의 경우 물리적 온도와 겉보기온도는 동일한데, 방사율이 0.94로서 거의 흑체에 가깝기 때문에 적외선화상을 통해 나타나는 물리적 온도와 겉보기온도는 차이가 아주 미약함을 확인할 수 있다. 한편, 물리적 온도 및 겉보기온도의 방사율에 따른 변화를 파악하기 위하여 방사율이 각각 0.54, 0.14일 때 적외선화상을 Fig. 12 및 Fig. 13에 나타내었는데, 우선 방사율이 0.94일 때의 결과와 비교해 볼 때 방사율이 작아질수록 물리적 온도가 상승함을 확인할 수 있고 이는 정진수 등<sup>(10)</sup>의 결과와 일치한다. 실제로 표적의 온폐를 위해서는 물리적 온도와는 전혀 다른 겉보기온도를 생성해내는 것이



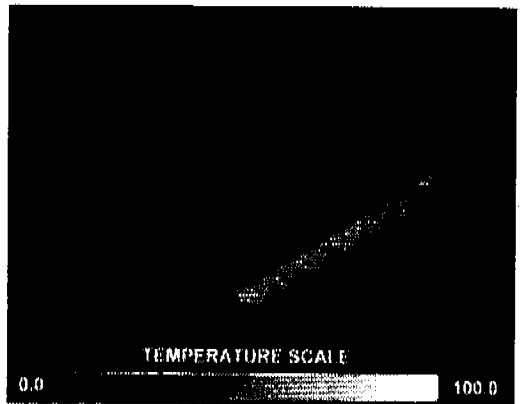
(a) Physical temperature based image



(a) Physical temperature based image



(b) Apparent temperature based image



(b) Apparent temperature based image

Fig. 11 Infrared image at 22:00 for  $\epsilon = 0.94$ .

Fig. 12 Infrared image at 22:00 for  $\epsilon = 0.54$ .

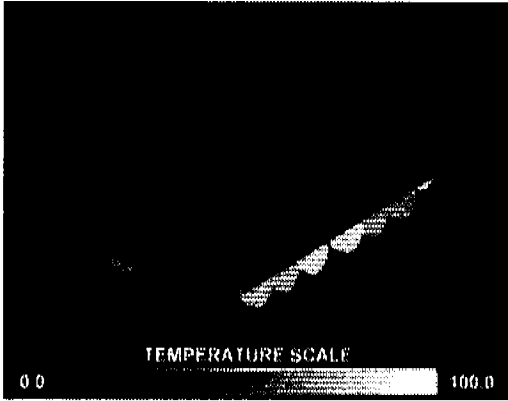
매우 중요한데 그림에서 알 수 있듯이 방사율이 작아질수록 배경에 대비되어 나타나는 표적의 특성이 더욱 더 억제되어 Fig. 13(b)와 같이 표적의 바퀴 부분을 식별할 수 없는 상황을 제공하게 되고, 이를 통해 방사율이 매우 작은 페인트를 이용하여 표면처리를 하여 겉보기온도를 줄일 수 있음을 알 수 있다. 겉보기온도 변화에 의한 표

$$\text{적온폐도구의 유용도 } \eta = \frac{(T_{phy} - T_{app})}{T_{phy}} \times 100$$

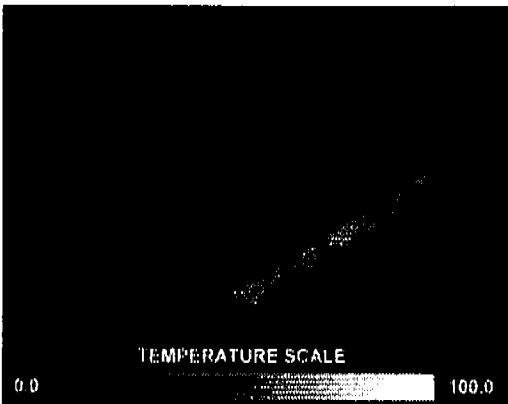
으로 정의하면 물리적 온도와 겉보기온도의 차이가 클수록 유용도가 커지게 되며 Fig. 14에 나타난 바와 같이 실제로 장파복사방사율이 작아질수록 유용도가 매우 큰 폭으로 증가함을 알 수 있다. 이를 통해 장파복사방사율이 작은 페인트

를 열원 주위에 표면처리함으로써 서론에서 언급했던 온도유사성을 쉽게 이룰 수 있음을 확인할 수 있다.

한편, 바퀴 부분에 부여된 열량을 제외한 후 방사율을 변화시켰을 때의 결과물 Fig. 15에 도시하였다. Fig. 14와 비교해볼 때 유용도 자체가 현저히 작아짐을 알 수 있으며 이를 통하여 방사율 변화에 의한 표적온폐는 열이 발생하는 열원 부분에 매우 유용함을 알 수 있다. 또한 방사율 변화에 의한 표적온폐도구는 물리적 온도는 높이고 겉보기온도는 줄임으로써 표적온폐도구가 지녀야 하는 기능을 매우 쉽게 제공하여 준다는 사실을 알 수 있다. 본 연구에서는 주로 야간을 대상으



(a) Physical temperature based image



(b) Apparent temperature based image

Fig. 13 Infrared image at 22:00 for  $\epsilon = 0.14$ .

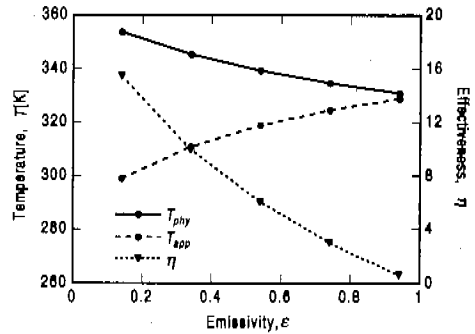


Fig. 14 Temperature and camouflage effectiveness variation with longwave emissivity for heat generation parts.

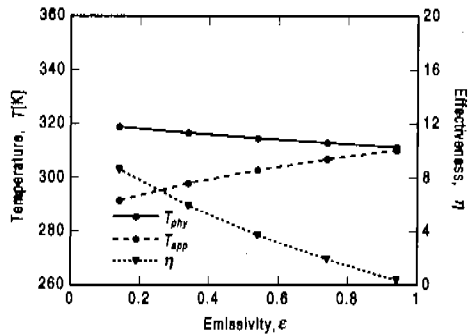


Fig. 15 Temperature and camouflage effectiveness variation with longwave emissivity for heat general parts.

로 하여 해석을 수행하였지만 주간까지 고려한다면 주위 배경색과 조화를 이룰 수 있는 색상을 지니고 장파복사방사율이 매우 작은 페인트가 가장 좋은 표적은페도구임을 알 수 있다. 한편, 본 결과를 바탕으로 방사율이 매우 작은 그물 등으로 표적 전체를 싸움으로써(camouflage clothing) 쉽게 공간유사성을 생성할 수 있음을 확인할 수 있으며 이 때도 마찬가지로 주위 배경을 고려하여 색상을 적절히 선택하여야만 한다.

#### 4. 결 론

적외선화상장비에 의한 표적의 탐지 및 포착시 온도유사성 및 공간유사성을 이루기 위해 이용되는 표적은페도구에 대해 연구하였다. 이를 위해서는 표적의 물리적 온도 및 겉보기온도를 계산해야 하는데 먼저 표적에 적용되는 전도, 대류, 장파복사 및 태양복사에 대한 관계식을 제시하고 이를 통해 개발된 열해석 프로그램을 통해 물리적 온도 및 겉보기온도를 계산할 수 있는 과정을 도입하였다.

적외선화상장비에 의한 표적 탐지시 정해진 파장영역내의 복사에너지를 이용하게 되는데 이 때 장파복사의 영향이 매우 커서 프로그램 작성시 반드시 필수적인 열전달방향을 확인하였고 복사교환계수 사용의 유용도를 검증하였다. 또한, 표적 탐지가 주로 야간에 이루어지기 때문에 컴퓨터에 의한 보사시 태양복사를 제외하기 쉽지만 실제로 온도이력 등의 관계로 인해 태양복사 또한 정확한 모델링을 통해 반드시 포함시켜야 함을 확인하였다.

한편, 실제 군사용 표적인 M2 전차에 대해 장파방사율을 변화시키면서 표적은페도구의 활용방향을 제시하였다. 장파복사방사율이 작아질수록 배경온도와 유사하게 되어 적외선화상 자체에서 표적과 배경을 구분하기 힘들게 되고 이를 통해 방사율이 작은 페인트에 의한 온도유사성 획득 가능성을 제시하였다. 또한, 표적 전체에 대한 camouflage clothing을 통해 공간유사성도 확립할 수 있음도 미루어 짐작할 수 있다.

#### 참고문헌

- (1) Jacobs, P., "Experimental Evaluation of Thermal Camouflage Effectiveness," *Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation*, Vol. 2469, pp. 462~472.
- (2) Hecker, R., "Camaleon-Camouflage Assessment by Evaluation of Local Energy, Spatial Frequency and Orientation," *Proceedings of SPIE, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds II*, Vol. 1687, pp. 342~349.
- (3) Walker, G. W and McManamey, J. R. "The Importance of Second-Order Statistics for Predicting Target Detectability," *Proceedings of SPIE, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds III*, Vol. 1967, pp. 308~319.
- (4) Kleindienst, S., Dimmeler, A. and Clement, D., "Obscuration Effects of Smoke Clouds," *Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation*, Vol. 2469, pp. 440~451.
- (5) Meitzler, T., Jackson, W. and Sohn, E., "Calculation of Background Clutter in Infrared Imagery: A Semi-Empirical Study," *Proceedings of SPIE, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds III*, Vol. 1967, pp. 525~533.
- (6) Ellison, G. N., 1984, *Thermal Computations for Electronic Equipment*, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 1~24.
- (7) 정진수 · 고상근 · 유호선, 1998, "'복잡한 삼차원 형상의 근사적 열해석을 위한 CAD와 열등가 회로법의 연계," 대한기계학회논문집 10월호 게재 예정
- (8) Jacobs, P. A. M., 1984, "Convective Heat Exchange of a Three-Dimensional Object Placed in the Open Field," *Archives for Meteorology, Geophysics, and Bioclimatology*, Ser. B, Vol. 33, pp. 349~358.
- (9) Patankar, S. V., 1980, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, McGraw-Hill, New York, pp. 44~47.
- (10) 정진수 · 고상근 · 유호선, 1998, "'적외선 파장대에서의 물체의 겉보기온도 예측," 대한기계학회논문집 심사중
- (11) Atwater, M. A. and Ball, J. T., 1978, "A

Numerical Solar Radiation Model based on Standard Meteorological Observations," *Solar Energy*, Vol. 21, pp. 163~170.

(12) Iqbal, M., 1983, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press, New York, pp. 169~181.