

## 적외선 파장대에서의 물체의 겉보기온도 예측

정진수\* · 고상근\*\* · 유호선\*\*\*  
(1998년 6월 20일 접수)

### Prediction of the Apparent Temperature of an Object under the Infrared Waveband

Jinsoo Jung, S. Ken Kauh and Hoseon Yoo

**Key Words:** Apparent Temperature(겉보기온도), Longwave Emissivity(장파방사율), Sky Temperature(천공온도), Terrain Temperature(지형온도), Radiation Exchange Factor(복사교환계수)

#### Abstract

Target detection by the infrared imager depends on the apparent temperature difference between the target and the background, so it is essential to predict apparent temperature variations for this purpose. In this study, thermal analysis program including conduction, convection and radiation is developed and applied to a representative geometry adequate for examining the apparent temperature characteristics. The results show that the longwave emissivity in association with the background temperature affects the apparent temperature strongly but does not affect the physical temperature. It is revealed that the background temperature plays a role of tuning the apparent temperature. As the longwave emissivity decreases, the apparent temperature decreases when the target is hotter than the background, whereas it increases in the reversed situation. These findings imply that an effective surface treatment, such as painting of a less emissive material, may provide a less detection probability and contribute to preventing the target from being detected at night.

#### 기호설명

*A* : 면적 [ $m^2$ ]  
*b* : 대류열전달계수 상관식 계수  
*B* : 복사교환계수  
*c*<sub>1</sub> : 스펙트럴출사량 *N*의 제 1 복사상수,  
 $3.742 \times 108 \text{ W} \cdot \mu\text{m}^4/\text{m}^2$   
*c*<sub>2</sub> : 스펙트럴출사량 *N*의 제 2 복사상수,  
 $1.439 \times 104 \mu\text{m} \cdot \text{K}$   
*C* : 유효컨덕턴스 [ $\text{W}/\text{K}$ ]  
*CAP* : 열용량 [ $\text{J}/\text{K}$ ]  
*C<sub>p</sub>* : 비열 [ $\text{J}/\text{kg} \cdot \text{K}$ ]

*d* : 열영역의 외향법선벡터  
*F* : 형상계수  
*h* : 대류열전달계수 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ]  
*H* : 상대습도 [%]  
*I<sub>d</sub>* : 임의의 열영역에 대한 태양복사 직사 성분 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
*I<sub>dr</sub>* : 임의의 열영역에 대한 태양복사 확산 성분 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
*I<sub>r</sub>* : 임의의 열영역에 대한 태양복사 반사 성분 [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]  
*k* : 열전도율 [ $\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$ ]  
*l* : 열영역의 기하학적 중심에서 공통집측 면적까지의 거리 [ $\text{m}$ ]  
*L* : 출사량 [ $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{sr}$ ]  
*m* : 대류열전달계수 상관식 계수  
*M* : 질량 [ $\text{kg}$ ]

\* 서울대학교 대학원 기계공학과  
 \*\* 회원, 서울대학교 기계공학과  
 \*\*\* 회원, 숭실대학교 기계공학과

$N$	: 스펙트럴출사량 [ $W/m^2 \cdot sr \cdot \mu m$ ]	$i$	: 임의의 열영역
$Ne$	: 네블로시티(Nebulosity)	$j$	: 임의의 열영역
$P$	: 복사교환계수 계산시의 반사 윗수	$n$	: 북쪽 방향 열영역
$q_{i,ss}$	: 열영역에 직접 도달하는 태양복사에 의한 열량 [ $W/m^2$ ]	$o$	: 열영역의 대류경계 표면적
$Q$	: 열량 [W]	$p$	: 태양복사 계산시의 투영면적
$r$	: 열영역의 총갯수	$phy$	: 물리적 온도
$R$	: 복사교환계수 계산시 반사된 에너지 양	ref-fs	: 처음 도달한 태양복사의 반사에 의한 출사량
<b>STAB</b>	: 안정성 상수	ref-long	: 장파복사의 반사에 의한 출사량
$t$	: 시간 [s]	ref-sun	: 태양복사의 다중반사에 의한 출사량
$T$	: 온도 [K]	$s$	: 남쪽 방향 열영역
$v$	: 대기의 속도 [m/s]	$sky$	: 장파복사 계산시의 천공
$x$	: x 방향 좌표	$solar$	: 태양복사에 의한 열량
$y$	: y 방향 좌표	$sun$	: 흑체로 가정했을 때의 태양온도
$z$	: z 방향 좌표	$u$	: 윗쪽 방향 열영역
$Z$	: 고도[km]	$w$	: 서쪽 방향 열영역

## 그리스문자

$\alpha$	: 태양복사흡수율
$\epsilon$	: 방사율
$\epsilon_0$	: 청정천공방사율
$\epsilon_s$	: 천공방사율
$\lambda$	: 파장 [ $\mu m$ ]
$\pi$	: 원주율
$\sigma$	: 스테판 볼츠만 상수, $5.670 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$
$\psi_v$	: 대기의 방향 [deg.]

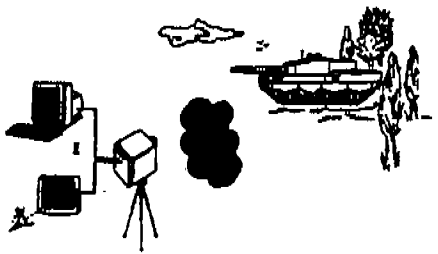
## 하첨자

$a$	: 공기온도
$app$	: 겉보기온도
$as$	: 태양복사에 의해 임의의 열영역에 직접 도달하는 열량
$b$	: 주어진 온도에서 흑체에 의한 출사량
$c$	: 공동접촉면적
$e$	: 동쪽 방향 열영역
$emit$	: 자체 방사에 의한 출사량
$gnd$	: 장파복사 계산시의 지형

## 1. 서론

군사적인 목적에서 어떤 배경(background)에 놓여있는 표적을 포착하고 탐지하기 위해서는 적어도 배경에 대비되어 표적의 식별을 가능하게 하는 특성의 차이가 존재해야 한다. 열상장비는 적외선 파장대(infrared waveband)에서 물체가 지니는 고유한 복사에너지를 이용하여 표적을 포착하고 탐지하는 장비로서 외계의 빛이 전혀 존재하지 않는 야간에도 관측이 가능하고 시계가 불명한 대기 조건에서도 적외선의 양호한 대기투과특성에 의해 다른 광학장비에 비하여 표적탐지 능력이 양호하다<sup>(1)</sup>. 복잡한 기후조건 및 여타의 환경 하에서 열상장비를 이용해 표적을 포착하는 전체적인 과정을 Fig. 1에 예시하였다.

열상장비는 표적과 배경과의 겉보기온도(apparent temperature) 차이를 특성 차이로 하여 표적을 포착하고 탐지하게 되는데, 겉보기온도라는 것은 열상장비로 표적을 탐지할 때 겉으로 나타나는 온도를 의미하며 흔히 온도라고 말하는 물리적 온도(physical temperature)와는 개념이 다르다. 사람의 눈이 물리적 온도 차이를 구별해 낼 수 있는 센서라면 열상장비는 겉보기온도 차이를 구별해 낼 수 있는 센서이다. 표적의 온도 및 탐지 목적을 위해서는 포착 및 탐지의 기준이 되는 특성 차이를 작게 또는 크게 해야 하기 때문에, 겉보기온도에 영향을 미치는 인자 및 겉보



processor system atmosphere target background

Fig. 1 Infrared observation scenario.

기온도의 거동에 대한 연구는 열상장비를 이용한 표적의 포착, 탐지 및 은폐에 필수적이다.

겉보기온도의 거동을 예측하기 위해서는 먼저 표적의 물리적 온도를 계산할 수 있는 열해석 프로그램이 필요하다. 겉보기온도를 포함한 적외선 파장대에서의 표적의 여러 가지 특성에 대한 연구는 미국과 북대서양 조약기구 회원국 등에서 주로 수행되고 있는데 미국의 경우 PRISM<sup>(2)</sup>이나 GTSIG,<sup>(2)</sup> SSGM,<sup>(3)</sup> SOSIS<sup>(4)</sup> 등의 프로그램이 개발되어 현재 사용되고 있다. 이런 프로그램들은 오랜 연구의 결과로서 결국 하나의 큰, 통합된 프로그램으로 개발, 발전되고 있다. 국내에서는 관련된 연구가 거의 없고 또한 있다 하더라도 대부분이 실험이나 열해석을 통한 표적의 특성 파악보다는 열상장비를 통해 획득한 적외선화상(infrared image) 처리 과정에 관한 것이다. Han 등<sup>(5)</sup>은 내부 열원을 갖는 비행기의 형상을 간단히 생성하고 열저항법을 이용하여 물리적 온도를 구하였다. 그러나, 겉보기온도나 배경의 효과 등에 관한 언급은 없으며 또한 표적의 열해석에 필수적인 모든 열전달량이 포함되지 않아서 다소 근사적인 방법밖에는 되지 않는다.

적외선 영역에는 2개의 대기창(atmospheric window)이 존재하며 그 파장대는 각각 8-12 $\mu$ m와 3-5 $\mu$ m이다. 지구 표면의 방사량은 그 온도를 평균온도 290K로 봤을 때 약 10 $\mu$ m 근처에 존재하게 되며 이것은 첫 번째 영역의 중간 부분이다. 또한 4 $\mu$ m은 두 번째 영역의 중간으로서 약 720K 온도에 해당되는데 엔진, 동력 발생기, 연소 가스 등의 고열원(hot source)을 탐지하는데 아주 적절하다<sup>(6)</sup>. 8-12 $\mu$ m의 파장대에서 대부분의 군사 표적과 자연 배경 등은 회체(grey body)로 여길 수 있고<sup>(7)</sup> 또한 온도가 매우 높지 않을 경우 파장대

가 8-12 $\mu$ m 영역에 포함되므로, 본 연구에서는 8-12 $\mu$ m의 장파 적외선 파장대를 대상으로 하여 겉보기온도에 영향을 미치는 인자 및 겉보기온도의 거동을 파악하고자 한다. 이런 목적에 부합되도록 먼저 여러 열전달 모드에 대한 적절한 모델링을 이용하여 열해석 프로그램을 작성하고 이를 통해 표적의 물리적 온도를 구한다. 또한, 삼차원 형상을 도입, 생성한 후 그 형상에 대해 열해석 프로그램을 적용하여 겉보기온도에 영향을 미치는 인자 및 겉보기온도의 거동을 파악한다.

## 2. 겉보기온도

### 2.1 복사교환계수

표면복사(surface radiation)를 다룰 경우 형상계수(view factor)를 계산하게 되는데, 형상계수는 어떤 두 면이 흑체일 경우 한 면에서 나온 복사 에너지가 다른 면에 흡수되는 분율(fraction)을 나타낸다<sup>(8)</sup>. 그러나, 실제로 대부분의 물체는 흑체가 아니기 때문에 형상계수가 아닌 다른 적절한 계수의 도입이 필요하다. 복사교환계수(radiation exchange factor)는 형상계수의 개념을 더 확대시킨 개념으로서, 면과 면사이의 다중반사 등을 포함해서 계산할 수 있다.<sup>(9)</sup>

표면  $i$ 에서 방사되어 표면  $j$ 에 직접 흡수되는 에너지분율  $B_{ij}^0$ 는  $F_{ij}\epsilon_j$ 와 같다. 여기서,  $B_{ij}$ 는 복사교환계수를 나타내며 위치자 0는 직접 흡수되어 한 번의 반사도 거치지 않았음을 의미한다. 반면, 표면  $i$ 에서 방사되어 다른 표면  $k$ 에 의해 반사된 에너지분율  $R_{ik}^1$ 은  $F_{ik}(1-\epsilon_k)$ 이므로 직접적인 흡수와 1번의 반사를 통해 표면  $j$ 에 흡수되는 에너지분율은 다음과 같다

$$B_{ij}^1 = B_{ij}^0 + \sum_k R_{ik}^1 F_{kj} \epsilon_j \quad (1)$$

표면  $i$ 에서 방사되어 표면  $j$ 에서 반사된 후 다시 표면  $k$ 에서 반사되는 에너지분율  $R_{ik}^2$ 은  $R_{ij}^1 F_{jk}(1-\epsilon_k)$ 로 표현되고 이런 과정을 일반화하면  $P$ 번 반사한 후의 에너지분율은 식 (2)와 같다.

$$B_{ij}^p = B_{ij}^{p-1} + \sum_k R_{ik}^p F_{kj} \epsilon_j \quad (2)$$

$B_{ij}^p$ 가  $B_{ij}^{p-1}$ 와 거의 차이가 없든지 또는 최대 반사회수를 넘을 때까지 계산을 수행하면  $B_{ij}$ 를 구할 수 있고 이 때  $j$ 에서 방사되어  $i$ 로 흡수되는 장파복사에 의한 열전달량  $Q_{ji}$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$Q_{ji} = \sigma B_{ji} \epsilon_j A_j (T_j^4 - T_i^4) = \sigma B_{ij} \epsilon_i A_i (T_j^4 - T_i^4) \quad (3)$$

본 연구에서는 FRED(Faceted Region Editor)<sup>(10)</sup>를 이용하여 복사교환계수  $B_{ij}$ 를 구하였다. 대기 중에 놓인 3차원 표적의 경우 표적의 여러 면과의 장파복사 뿐만이 아니라 천공(sky) 및 지형(terrain)과도 복사를 하게 되는데 계산되는  $B_{ij}$ 에는 천공 및 지형과의 복사교환계수도 포함된다.

## 2.2 겉보기출사량 및 겉보기온도

흑체의 경우 스펙트럼출사량(spectral radiance)  $N(\lambda, T)$ 는 플랑크분포(Planck distribution)로 주어진다.

$$N(\lambda, T) = \frac{C_1}{\pi} \left[ \lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right\} \right]^{-1} \quad (4)$$

위 식을 8-12 $\mu\text{m}$ 의 파장대에 대해 적분하면 특정 온도에 해당하는 전체 출사량  $L$ 을 계산할 수 있고 열상장비는 이 양을 측정하게 된다. 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 (5)와 같다.

$$L_i = L_{i, \text{emit}} + L_{i, \text{ref-long}} + L_{i, \text{ref-sun}} \quad (5)$$

자체방사에 의한 출사량  $L_{i, \text{emit}}$ 는  $\epsilon_i L_{i, b}$ 로

쉽게 계산되고, 장파복사 반사에 의한 출사량  $L_{i, \text{ref-long}}$ 은 복사교환계수의 정의 및 상호관계(reciprocity relation)  $B_{ji} \epsilon_j A_j = B_{ij} \epsilon_i A_i$ 를 통해 다음과 같이 표현된다.

$$L_{i, \text{ref-long}} = (1 - \epsilon_i) [B_{i, \text{gnd}} L_{\text{gnd}} + B_{i, \text{sky}} L_{\text{sky}} + \sum_{j=1}^r B_{ij} L_{j, b}] \quad (6)$$

임의의 열영역  $i$ 에 직접 도달하는 태양복사에 의한 열량을  $q_{i, \text{sun}}$ 라고 하면,  $i$ 에서 반사되는 복사량 중에서 8-12 $\mu\text{m}$ 의 파장대에 속한 양은 다음과 같다.

$$L_{i, \text{ref-fs}} = (1 - \epsilon_i) q_{i, \text{sun}} \frac{\int_8^{12} N(\lambda, T_{\text{sun}}) d\lambda}{\sigma T_{\text{sun}}^4} \quad (7)$$

여기서 첨자 ref-fs는 태양복사 에너지가 열영역  $i$ 에 처음 부딪힌 후(first strike) 반사되는 것을 의미하며, 다른 열영역  $j$ 에서 반사되어 들어오는 복사량까지 고려하면 태양복사 반사에 의한 복사량은 다음과 같이 표현된다.

$$L_{i, \text{ref-sun}} = L_{i, \text{ref-fs}} + (1 - \epsilon_i) \sum_{j=1}^r B_{ij} L_{j, \text{ref-fs}} \quad (8)$$

각 열영역의 온도가 구해지면 출사량  $L$ 을 구할 수 있으며 식 (5)를 이용하여 전체 복사량을 쉽게 계산할 수 있다. 어느 특정 온도의 흑체에서 나오는 전체 출사량과 어느 회체에서 방사 및 반사를 통해 나오는 전체 출사량이 같으면 열상장비는 두 물체를 구별할 수 없다. 이 때, 두 물체의 겉보기출사량은 같고, 그 흑체의 특정 온도 물 겉보기온도라고 한다. 겉보기온도는 흑체에 대한 겉보기출사량을 통해 쉽게 계산할 수 있으며, 또한 겉보기출사량보다는 겉보기온도에 의해 결과를 고찰하는 것이 더 이해가 쉽고 배경과 배경온도 등에 대한 영향도 보다 쉽게 파악할 수 있다.

### 3. 열동가회로 해석

#### 3.1 기본 공식화

열영역은 한 물체를 여러 영역으로 구분했을 때 온도 및 물성치가 같은 부분을 의미하며 다른 열영역과 상호 연결되어 있다. 임의의 열영역  $i$ 에 대해 열용량(thermal capacitance) 및 그 열영역으로의 열 출입을 고려하면, 식 (9)와 같이 간단하게 표현할 수 있다.<sup>(11)</sup>

$$\sum Q_i = M_i \cdot C_{p,i} \left( \frac{dT_i}{dt} \right) \quad (9)$$

유효컨덕턴스(effective conductance)  $C_{\bar{n}}$ 를 도입하면 전도, 대류 및 장파복사에 대한 열전달량은 식 (10)과 같이 계산되고

$$Q_{\bar{n}} = C_{\bar{n}}(T_j - T_i) \quad (10)$$

전도, 대류 및 장파복사에 대응하는  $C_{\bar{n}}$ 는 각각 다음과 같다.

$$C_{\bar{n}} = \frac{A_{\bar{v},c}}{\frac{l_i}{k_i} + \frac{l_j}{k_j}} \text{ (conduction)} \quad (11)$$

$$C_{\bar{n}} = hA_{i,o} \text{ (convection)} \quad (12)$$

$$C_{\bar{n}} = \sigma B_{\bar{v}} \epsilon_r A_i (T_i^2 + T_j^2)(T_i + T_j) \text{ (longwave radiation)} \quad (13)$$

위 식에서  $A_{\bar{v},c}$ 는 서로 접하고 있는 열영역들의 공통접촉면적,  $l$ 은 열영역의 기하학적 중심에서 공통접촉면적  $A_{\bar{v},c}$ 까지의 거리를 나타내며  $A_{i,o}$ 는 열영역  $i$ 의 대기와의 접촉면적을 나타낸다. 수식의 간편화를 위해 열용량 및 안정성 상수  $CAP_i = M_i \cdot C_{p,i}$ ,  $STAB_i = \frac{\Delta t}{CAP_i} \sum_{j=1}^N C_{\bar{n}}$ 를 각각 정의하고<sup>(12)</sup> 각각의 항들을 식 (9)에 대

입하여 정리하면 임의의 시간에서의 온도  $T_i'$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$T_i' = \frac{\left[ \sum_{j=1}^N C_{\bar{n}} T_j + \sum_{j=1}^N C_{\bar{n}} T_j' + 2Q_{i, solar} \right]}{\sum_{j=1}^N C_{\bar{n}} \left( 1 + \frac{2}{STAB_i} \right)} - \frac{T_i \sum_{j=1}^N C_{\bar{n}} \left( 1 - \frac{2}{STAB_i} \right)}{\sum_{j=1}^N C_{\bar{n}} \left( 1 + \frac{2}{STAB_i} \right)} \quad (14)$$

여기서,  $Q_{i, solar}$ 는 태양복사에 의한 열량을 나타내는데 다른 세가지 열전달 모드와는 달리 열영역의 온도  $T_i$ 와는 무관하다. 미지 온도가 서로 연계되어 있으므로 반복 계산법에 의해 해결구하게 된다.

#### 3.2 전도열전달

전도열전달에 대한 유효컨덕턴스는 FRED를 통해 계산되며 그 계산식 및 계산 과정은 식 (11) 및 Fig. 2에 나타난 바와 같다.<sup>(13)</sup> 그림에서 알 수 있듯이 공통접촉면적과 기하학적 중심에서 공통접촉면적까지의 거리를 계산하여 컨덕턴스를 계산하게 된다. 계산에 필요한 물성치는 외부 파일에 저장되어 있으며 물성치의 추가 및 삭제도 가능하다.

#### 3.3 대류열전달

대기에 의한 대류열전달에서 유효컨덕턴스는 대류열전달계수를 필요로 하는데, 대기에 의한 대류열전달이 난류이고 바람의 방향이 수시로 바뀌기 때문에 대류열전달계수의 측정 및 모델링이 매우 어렵다. Jacobs<sup>(14)</sup>는 대기 중에 놓여 있는, 높이, 가로, 세로가 각각 1m, 2m, 1m인 직육면체를 대상으로 직접 실험을 수행하여 대류열전달계수를 측정하였다. Jacobs에 의하면 대기에 의한 대류열전달계수는 대기속도 및 대기가 불어오는 방향의 함수로 가정할 수 있고 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$h = b(v)^m f(\phi, d) \quad (15)$$

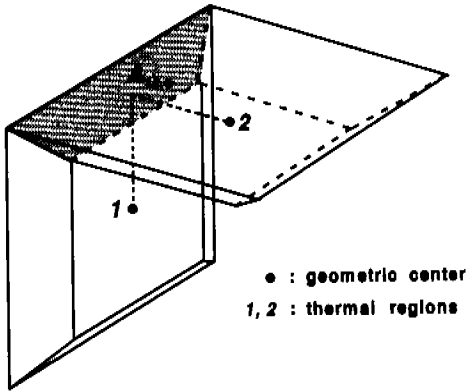


Fig. 2 A typical example of conduction calculation in FRED.

대류열전달계수를 계산하기 위해서는 식 (15)의 우변 항을 파악해야 하는데 모든 면에 대해 이를 파악하는 것은 불가능하다. Jacobs는 위의 식에 근거하여 수평면 및 수직면에 대해 실험을 수행한 후 결과를 통합하여 대류열전달계수 상관식을 제안하였는데 각 계수는 Table 1과 같다.

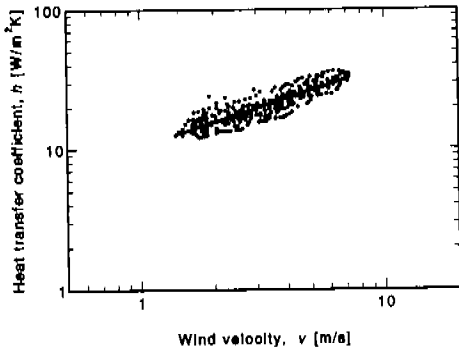


Fig. 3 Heat transfer coefficient for windward vertical surface.

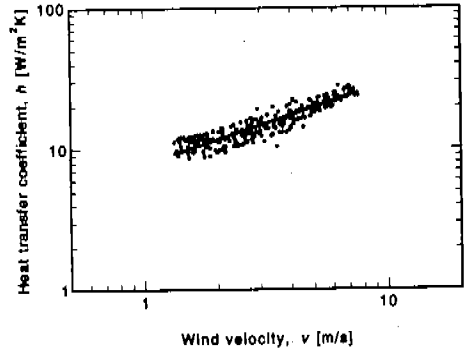


Fig. 4 Heat transfer coefficient for leeward vertical surface.

이 결과를 도시하면 수직면에 대해 바람이 불어 들어오는 경우(windward)와 바람이 불어나가는 경우(leeward)에 대한 대류열전달계수 결과는 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 도시된 바와 같고, 수평면에 대한 대류열전달계수의 대기속도에 대한 변화

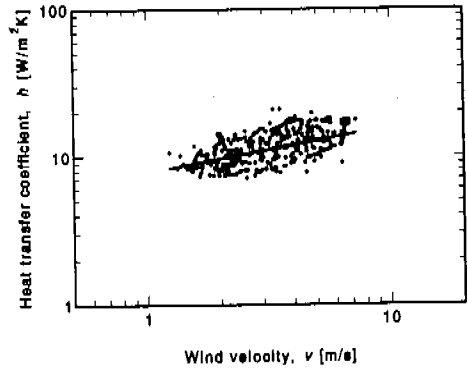


Fig. 5 Heat transfer coefficient for horizontal surface.

Table 1 Correlation coefficients for convection heat transfer.

Orientation	$b$	$m$	$\Delta h(rms)$
Horizontal	10.5	0.57	2.1
Vertical, windward	7.9	0.57	1.6
Vertical, leeward	7.9	0.30	1.8

는 Fig. 5에 나타내었다.

#### 4. 복사 모델링

열영역의 장파복사 대상에는 천공, 지형 및 다른 열영역이 포함되며, 장파복사 계산을 위해서는 천공온도(sky temperature) 및 지형온도(terrain temperature)에 대한 모델링 및 계산이 필수적이다.

##### 4.1 천공온도의 계산

일반적으로 천공방사율은  $\epsilon_s$ , 또는  $\epsilon_0$ 로 표시되는데 다음 식으로 정의되며

$$\epsilon_s = (T_{sky}/T_a)^4 \quad (16)$$

위 식으로부터 천공온도는 다음과 같이 표현된다.

$$T_{sky} = (\epsilon_s T_a^4)^{1/4} \quad (17)$$

천공온도를 구하기 위해서는 천공방사율을 계산해야하는데, Centeno<sup>(15)</sup>는 청정천공(clear sky) 방사율  $\epsilon_0$ 를 다음과 같이 제시하였고

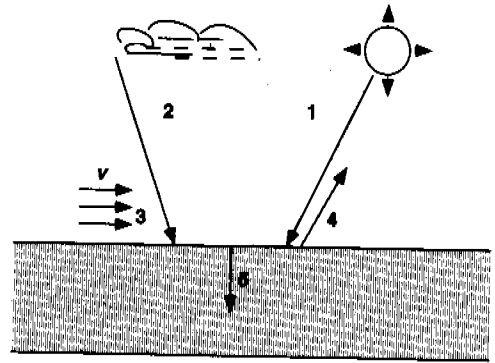
$$\epsilon_0 = 0.0001 \times 0.95555(0.6017)^Z \times H^{0.0665} T_a^{1.189} + 0.0001 \times 5.7723 \times H^{0.0665} T_a^{1.189} \quad (18)$$

청정천공이 아닌 경우에는 네블로시티(Nebulosity)라는 개념을 도입하여 일반적인 천공 방사율  $\epsilon_s$ 를 식 (19)와 같이 계산하였다.

$$\epsilon_s = Ne[1 - (3000 + 1751Z^{0.652})H^{-1.5} T_a^{-1}]^4 + (1 - Ne)\epsilon_0 \quad (19)$$

##### 4.2 지형온도의 계산

지형온도는 지형에 대한 모델링을 통해서 구할 수 있다<sup>(16)</sup>. 지형을 수평 방향으로로는 무한 평판으로 보고 수직 방향에 대해 여러 개의 층으로 분



- 1 : shortwave irradiance
- 2 : longwave irradiance
- 3 : convective heat exchange
- 4 : surface emission
- 5 : heat conduction through the surface

Fig. 6 Heat transfer processes at terrain boundary.

할하여 1차원 비정상 전도 방정식을 차분화한 뒤 식을 세우고, 상부 경계조건으로 열평형식을 이용하고 하부 경계조건으로 일정 온도 조건을 사용하면 시간 경과에 따른 지형온도의 변화를 계산할 수 있다. 상부 경계조건으로 사용되는 여러 열전달량의 분포는 Fig. 6에 도시하였다.

##### 4.3 태양복사 모델링

Atwater<sup>(17)</sup>은 기존 연구자의 연구를 종합하여 구름에 의한 태양복사 감소까지 계산할 수 있는 태양복사 계산식을 제안하였다. 본 연구에서는 Atwater등의 결과물 이용하여 태양복사를 계산하였고 이 때 태양고도를 계산하기 위한 여러 가지 인자는 Iqbal<sup>(18)</sup>을 참조하였다. 임의의 열영역  $i$ 에 도달하는 태양복사 성분은 각각 직사성분(direct component), 확산성분(diffuse component) 및 지형으로부터의 반사성분(reflected component)으로 구성되며 수식으로 표현하면 식 (20)과 같다.  $q_{i,ss}$ 는 태양복사흡수율에 의한 태양복사의 흡수 및 다른 열영역으로부터의 반사를 고려하지 않은 양이므로 이를 고려하여 정리하면 태양복사에 의한 열영역으로의 최종적인 열량은 식 (21)과 같이 계산된다. 여기서  $A_i$ 는 열영역  $i$ 의 면적,  $A_{i,b}$ 는 직사성분에 수직인,  $A_i$ 의 면적을 나타내고  $F_{isky}$ 와  $F_{ignd}$ 는 각각 천공과 지형

에 대한 형상계수값 의미한다.

$$q_{i, \text{sa}} = \frac{1}{A_i} [A_{i, \beta} I_d + A_i (F_{\text{iskv}} I_{\text{dr}} + F_{\text{ignd}} I_r)] \quad (20)$$

$$Q_{i, \text{solar}} = [\alpha A_i q_{i, \text{sa}} + \sum_{j=1}^6 (B_{ji} (1 - \alpha_j) A_j q_{j, \text{sa}})] \quad (21)$$

### 5. 결과 및 고찰

결보기온도의 거동을 파악하기 위한 예로서 Fig. 7과 같은 시험형상을 도입하여 열해석을 수행하였다. 모든 변의 길이는 1m이고 점선으로 표시된 내부 면은 0.75m이며 모든 부분이 밀폐되어 있다. 이 형상은 별개의 물성치가 부여될 수 있는 6개의 열영역으로 구성되어 있고 s, n, e, w, u는 각각 남, 북, 동, 서, 상향을 가리킨다. 간단한 형상이지만 복사특성이 본질적으로 상이한 5개 면(밀면 제외)을 포함하고 있기 때문에 결보기온도에 관한 많은 결과물 도출해 낼 수 있다. 특히,

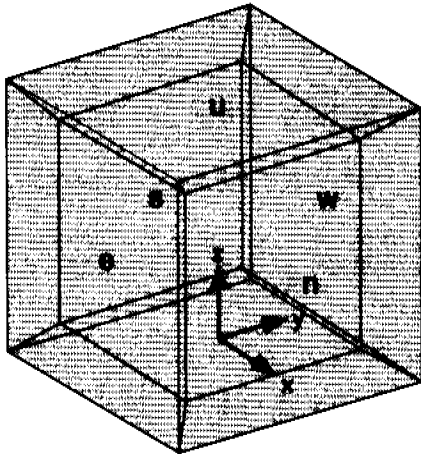


Fig. 7 Testbox geometry and coordinate system.

u-열영역의 경우는 장파복사를 하게 되는 배경이 천공밖에 없고 e-열영역의 경우는 지형 및 천공과 장파복사를 갖게 되어 서로 다른 배경 및 배경온도의 영향을 쉽게 파악할 수 있다. 한편, 이런 시험형상에 대해 열해석을 수행하기 위해서는 날씨에 관계되는 여러 변수에 대한 입력값이 필요하다. 날씨 변수의 경우 여름, 겨울마다 다르고 또한 지리적인 위치 및 구름의 양 등에 좌우되기 때문에 절대적인 기준을 정할 수는 없다. 본 연구에서는 날씨 변수에 대한 정확한 값이 알려진, Table 2에 나타난 바와 같은 위치 및 시간을 기준으로 연구를 수행하였다.

태양복사를 계산할 때 태양고도를 정확히 알아야 하는데 이를 위해서는 다양한 인자의 계산이 필수적이다. 이런 인자들이 제대로 계산되었는지 간접적으로 알아보기 위하여, e-와 w-열영역의 온도분포를 Fig. 8에 나타내었다. e-열영역은 시간 경과에 따라 태양복사 영향이 점점 작아지기 때문에 전체적으로 시간이 지남에 따라 약간씩 온도가 작아짐을 알 수 있고, w-열영역은 초기에는 태양복사의 영향이 미약하지만 늦은 오후로 지나가면서 태양복사의 영향으로 인해 점점 온도가 높아짐을 알 수 있다. 이 결과를 통해 태양고도 및 이에 관계되는 인자의 정확성을 확인할 수 있다.

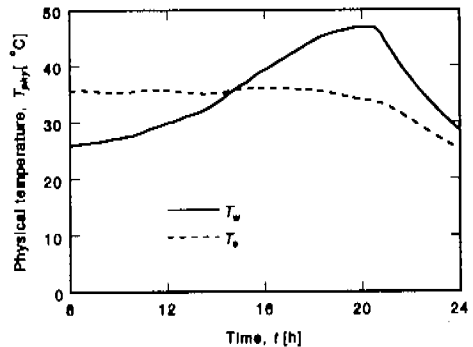


Fig. 8 Timewise temperature variation of w- and e- thermal region.

Table 2 Seasonal and geographical information for the present simulations.

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



배경 및 배경온도가 겉보기온도에 끼치는 영향을 파악하기 위해서는 먼저 표적 및 배경온도의 시간에 따른 변화 및 온도차이 등을 파악해야 한다. Fig. 9에 시간에 따른 지형온도, 천공온도 및 u-와 e-열영역의 물리적 온도 변화를 나타내었다. 약 18시를 기준으로 하여 지형과 2개의 열영역 간의 온도차가 역전되기 시작하며 특히 u-열영역의 온도는 천공온도보다 항상 높으며 온도차 또한 매우 크다.

물리적 온도가 장파방사율에 따라 크게 변화하게 되면 결국 겉보기온도도 많은 영향을 받게 된다. 장파방사율이 물리적 온도에 끼치는 영향을 알아보기 위하여 Fig. 10과 Fig. 11에 각각 u-와 e-열영역의 장파방사율에 대한 물리적 온도의 변화를 도시하였다. u-열영역의 경우 단지 천공과 장파복사를 교환하는데 천공온도가 매우 낮기 때문에 장파방사율이 작아질수록 약간씩 온도가 높아짐을 알 수 있다. 반면에, e-열영역의 경우 u-열영역과 마찬가지로 천공과 장파복사를 갖게 되지만 지형의 높은 온도와의 복사 교환하기 때문에 절대적인 온도차이는 u-열영역보다 약간 작다. 전반적으로 보면 장파방사율에 따라 약간씩 온도차이가 존재하긴 하지만 물리적 온도는 장파방사율에 영향을 받지 않는다는 사실을 알 수 있다. 한편, 장파방사율이 겉보기온도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Fig. 12와 Fig. 13에 겉보기온도의 거동을 장파방사율을 바꿔가면서 나타내었다.

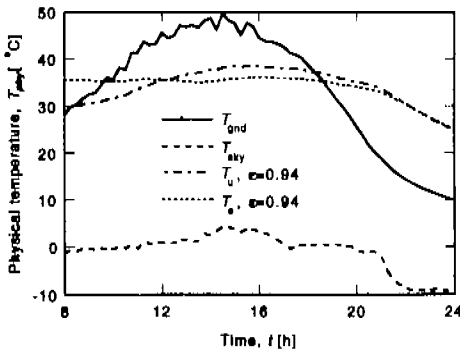


Fig. 9 Timewise temperature variation of target and background.

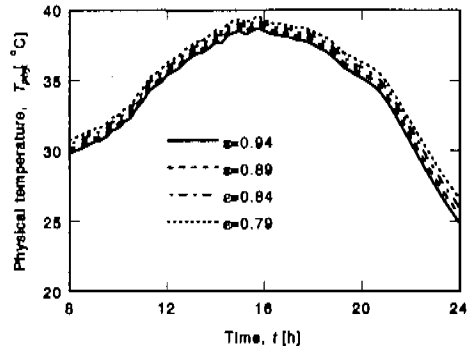


Fig. 10 The variation in physical temperature of the u-region for different longwave emissivities.

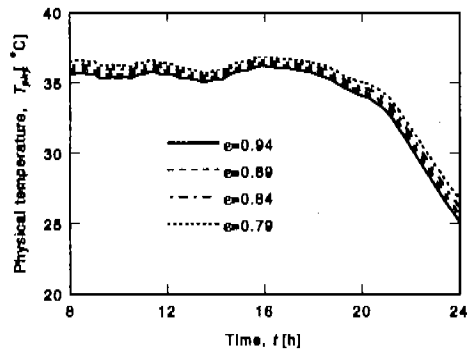


Fig. 11 The variation in physical temperature of the e-region for different longwave emissivities.

겉보기온도는 물리적 온도와는 달리 장파방사율이 작아질수록 더욱 더 작아진다는 사실을 확인할 수 있으며, 장파방사율 뿐만 아니라 그 배경온도도 겉보기온도에 많은 영향을 미친다는 사실을 도출할 수 있다. 그러나, Fig. 13의 14시의 경우 Fig. 9에서 알 수 있듯이 지형온도가 전체시간 중 가장 높고 이 때 장파방사율에 따른 겉보기온도의 경향이 역전되려 한다는 사실을 확인할 수 있다. 열상장비에 의한 표적의 포착 및 탐지는 주로 야간에 이루어지며 이 때는 주로 표적의 온도가 배경온도보다 더 높고 특히 그 표적이 정지해 있지 않고 운전 중인 상태에서는 표적 온도

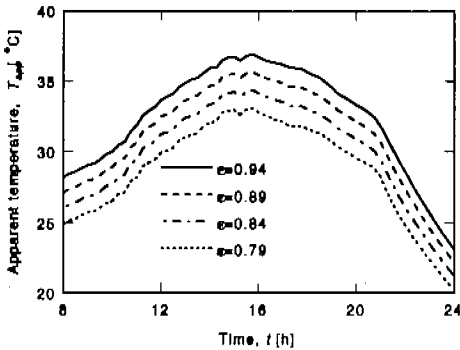


Fig. 12 The variation in apparent temperature of the u-region for different longwave emissivities.

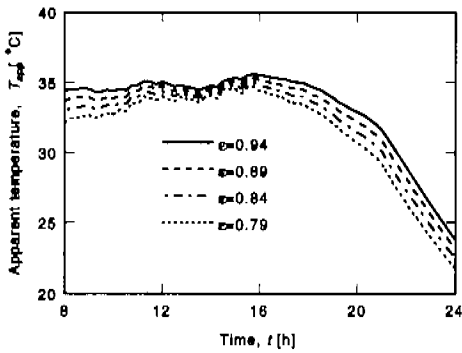


Fig. 13 The variation in apparent temperature of the e-region for different longwave emissivities.

가 배경온도보다 더욱 더 크다. 표적 포착은 결국 표적과 배경의 겉보기온도차에 의한 것이기 때문에 표적의 표면에 장파방사율이 아주 작은 페인팅 처리를 하여 인위적으로 장파방사율을 낮추게 된다면 겉보기온도차를 줄일 수 있고 이를 통해 표적의 탐지 및 포착을 방해할 수 있다.

또 다른 인자인 태양복사흡수율(solar absorptivity)의 온도에 대한 영향을 파악하기 위하여 Fig. 14와 Fig. 15에 태양복사흡수율에 대한 물리적 온도의 변화를 나타내었다. 흡수율이 커질수록 태양복사에 의한 열량이 증가하기 때문에 물리적 온도 자체가 상당히 커진다는 것을 알 수 있으며 온도 변화 폭도 상당히 크다는 것을 알

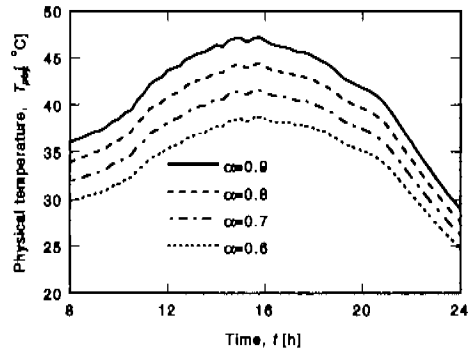


Fig. 14 The variation in physical temperature of the u-region for different solar absorptivities.

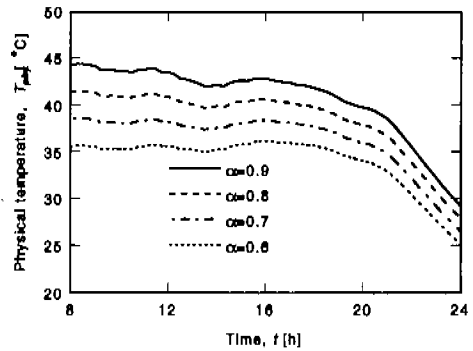


Fig. 15 The variation in physical temperature of the e-region for different solar absorptivities.

수 있다. 겉보기온도의 태양복사흡수율에 대한 변화는 Fig. 16과 Fig. 17에 나타난 바와 같다. 장파방사율과는 달리 겉보기온도의 경향이 물리적 온도의 경향과 매우 유사하다는 것을 알 수 있고 또한 흡수율이 클수록 겉보기온도도 더욱 더 크다. 단지 겉보기온도가 물리적 온도에 비해 약간 낮아진다는 사실을 알 수 있고 장파방사율의 경우와는 달리 주위 배경온도에도 무관함을 알 수 있다. 표적 온도를 위해서는 물리적 온도차와 전혀 다른 겉보기온도차를 구현해야 하는데 태양복사흡수율의 경우 물리적 온도차와 겉보기온도차가 큰 차이가 없으므로 표적포착의 방해물 위해 태양복사 방사율을 변화시키는 것은 큰 의미가

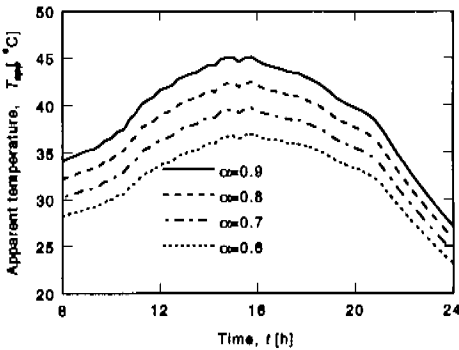


Fig. 16 The variation in apparent temperature of the u-region for different solar absorptivities.

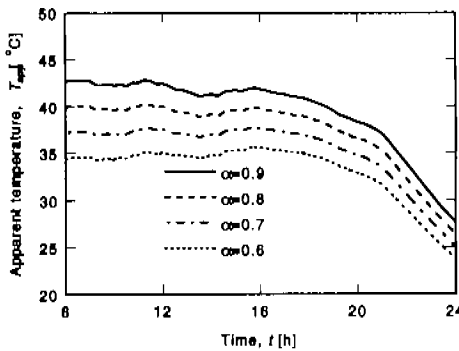


Fig. 17 The variation in apparent temperature of the e-region for different solar absorptivities.

없다는 사실을 알 수 있다.

### 6. 결 론

열상장비에 의한 표적의 탐지 및 포착시 기준이 되는 겉보기온도의 거동 및 겉보기온도에 영향을 미치는 인자에 대해 연구하였다. 먼저, 겉보기온도를 계산하기 위해서는 표적의 실제 온도를 예측해야 하며 이를 위해 표적에 적용되는 전도, 대류, 장파복사 및 태양복사에 대한 관계식을 유도하고 이를 프로그래밍화하였다. 장파복사 계산시에는 복사교환계수의 개념을 도입하여 정확한 계

산을 유도하였으며 또한 겉보기온도의 계산에도 이를 삽입하여 온도에 의한 자체 복사량만으로 겉보기복사량 및 겉보기온도를 계산할 수 있도록 하였다.

단순하면서도 겉보기온도 거동을 쉽게 파악할 수 있는 형상을 도입하고 이에 대해 열해석을 수행하여 겉보기온도에 영향을 끼치는 인자를 파악하였다. 모사에 필요한 지리적인 위치 및 시간온 날씨 변수가 정확히 알려져 있는 장소 및 시간을 택했으며 정확성을 기하기 위해 날씨는 매우 맑은 날씨로 한정하였다. 해석 결과 물리적 온도는 장파방사율과는 거의 무관한 경향을 보이고 반면에 겉보기온도는 장파방사율에 아주 큰 영향을 받으며 특히 주위 배경인 천공과 지형온도의 조합에 의해 그 경향이 달라지는 경향을 나타내었다. 주위 배경온도가 표적의 온도보다 낮을 경우에는 장파방사율이 작을수록 겉보기온도가 작고 배경온도가 표적외 온도보다 매우 높을 때는 장파방사율이 작을수록 겉보기온도가 커짐을 알 수 있었고 이를 통해 주로 야간에 이루어지는 표적의 탐지 및 포착을 방해할 수 있는, 장파방사율이 작은 페인트를 표적의 표면에 처리하는 기술의 적용 가능성은 확인할 수 있었다. 태양복사 흡수율을 변화시켜 가며 해석을 수행한 결과 겉보기온도보다는 실제 온도를 많이 변화시킴을 알 수 있었고 또한 겉보기온도와 물리적 온도의 차이가 거의 없기 때문에 표적포착 방해물 위하여 태양복사 방사율을 변화시키는 것은 큰 의미가 없음을 알 수 있다. 결론적으로, 가장 기본이 되는 형상에 대해 겉보기온도의 거동을 파악함으로써 열상장비물 이용한 기존의 표적포착 및 탐지 방식에 쉽게 응용될 수 있는 결과물 도출하였다.

### 참고문헌

- (1) 홍석민, 1992, 열상장비 개론, 국방과학연구소 기술보고서, pp. 1-19.
- (2) Morey, B., Ellis, K., Perry, D. and Gleichman, K., 1994, Infrared Signature Simulation of Military Targets, Infrared Information Analysis Center, Ann Arbor, pp. A1-A5.
- (3) Wilcoxon, B. and Heckathorn H., 1995, "Synthetic Scene Generation Model(SSGM

- R6.0)," Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation, Vol. 2469, pp. 300-317.
- (4) Harris, J. W. and Williams, W. D., 1993, "SOSIS: Infrared Ocean Simulation Package with Target Interactions," Proceedings of SPIE, Characterization, Propagation, and Simulation of Sources and Backgrounds III, Vol. 1967, pp. 235-243.
- (5) Han, S. H., Hong, H. K., Hong G. P. and Choi, J. S., 1996, "Modeling of 3D Object Considering Internal Heat Source," Proceedings of SPIE, Targets and Backgrounds: Characterization and Representation II, Vol. 2742, pp. 169-176.
- (6) Jacobs, P. A. M., 1996, Thermal Infrared Characterization of Ground Targets and Backgrounds, SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, pp. 3-21.
- (7) Shumaker, D. L., Wood, J. T. and Thacker, C. R., 1988, Infrared Imaging Systems Analysis, Infrared Information Analysis Center, Ann Arbor, pp. 2.33-2.43.
- (8) Siegel, R. and Howell, J. R., 1981, Thermal Radiation Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, pp. 172-182.
- (9) Johnson, K. R., Curran, A. R., Marttila, E. A., Wood, B. S. and Rynes, P. L., 1994, "Thermal Modeling in Automotive Design," Proceedings of the Fifth Annual Ground Target Modeling & Validation Conference, pp. 371-382.
- (10) Buxton, T. and Petzko, D., 1996, FRED User's Manual, Optimetrics, Inc, Ann Arbor, pp. 10.1-11.2
- (11) Holman, J. P., 1992, Heat Transfer, McGraw-Hill, New York, pp. 172-191.
- (12) Ellison, G. N., 1984, Thermal Computations for Electronic Equipment, Van Nostrand Reinhold, New York, pp. 1~24.
- (13) 정진수 · 고상근 · 유호선, 1998, "복잡한 삼차원 형상의 근사적 열해석을 위한 CAD와 열동기회로의 연계", 대한기계학회논문집(B) 10월호 게재예정
- (14) 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, No. 4, pp 349-358.
- (15) Centeno, M. V., 1982, "New Formulae for the Equivalent Night Sky Emissivity," Solar Energy, Vol. 28, No. 6, pp. 489-498.
- (16) Balick, L. K., Link, L. E. and Scoggins, R. K., 1981, "Thermal Modeling of Terrain Surface Element," Technical Report EL 81-2, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station
- (17) 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.
- (18) Iqbal, M., 1983, An Introduction to Solar Radiation, Academic Press, New York, pp. 169-181.