

## 측정된 기상 조건 데이터를 이용한 지상물체의 표면온도 특성 연구

### Modeling of Surface Temperature Characteristics on the Ground by using the Measured Weather Condition Data

최준혁\*                      박태원\*                      김태국\*  
Jun-Hyuk Choi              Tae-Won Park              Tae-Kuk Kim

#### Abstract

This paper is a part of developing a program that predicts the surface temperature and the IR images of ground objects by considering solar irradiation and atmospheric convection. The thermal modeling is essential for identifying objects on the scenes obtained from the remote sensing. And the temperature distribution on the objects is necessary to obtain their infrared images in contrast to the background. We considered the composite heat transfer modes including conduction, convection and spectral solar radiation incident on the objects within a scene to calculate the surface temperature distribution. The surface temperatures obtained by using the S/W developed in this study(Silhouette) and a commercial S/W(SE-Workbench-IR) are computed and compared each other. Results obtained by using the S/W developed in this study(Silhouette) show fairly good agreement with those obtained by the SE-Workbench-IR.

Keywords : Surface Temperature(표면온도), Heat Transfer(열전달), Weather Conditions(기상조건), Silhouette(개발된 프로그램명), SE-Workbench-IR(상용 프로그램명)

#### 1. 서론

적외선 탐색기는 물체 뿐 만 아니라 주위 배경의 적외선 신호도 탐지하게 된다. 따라서 군사적으로 공격하는 목적이나 방어하는 목적인 경우에도 물체가 주위 배경에 대비되는 값이 매우 중요하게 인식되고

있다. 특히 주위 은폐물이 전혀 없는 물체의 경우 주변 환경 조건은 거의 균일한 온도 및 복사 특성을 갖는 반면에 그 위에 놓인 물체는 주위 배경에 대비되는 다른 온도 및 복사 특성을 가지고 있기 때문에 적외선 특성을 이용하는 유도 무기에 쉽게 노출될 수 있는 위험성이 있다. 특히 현재 군사적인 용도로 가장 위험도가 높은 적외선 유도 미사일의 경우 주변 환경과 대비되는 물체에서 방출되는 복사에너지를 탐지하는 기능을 장착하고 있다. 이러한 물체에서 방출되는 복사에너지는 절대온도 0K 이상일 때 해당되며 현대

† 2010년 3월 12일 접수~2010년 5월 13일 게재승인

\* 중앙대학교(Chung-Ang University)

책임저자 : 김태국(kimtk@cau.ac.kr)

전에서 적외선 호밍 방법 등으로 발전해 나가고 있으며 전 세계적으로 IR 스텔스 기능에 관하여 많은 관심을 가지는 계기가 되었다. 적외선 신호의 경우 레이더와는 달리 방어하는 입장에서 살펴보면 상대방이 자신을 탐지한다는 사실을 모르기 때문에 요격 당하는 경우가 많다. 따라서 IR 신호에 대한 분석 연구가 필요한 실정이며 현재 국내에서도 많은 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>.

IR 신호를 분석하기 위한 방법으로는 실제 관심 있는 군 장비에 대하여 IR 카메라를 이용하여 실측된 데이터를 획득하는 것이지만 모든 다양한 환경 인자를 고려하기에는 거의 불가능하다고 할 수 있다. 따라서 이를 대체하는 방법으로 적외선 예측 프로그램을 이용하는 방법이 대두되고 있다. 대표적인 적외선 영상 생성 소프트웨어로는 DIRSIG(Digital Image and Remote Sensing)<sup>[2]</sup>, ShipIR/NTCS<sup>[3]</sup>, SE-Workbench-IR<sup>[4]</sup>, RadthermIR<sup>[5]</sup> 등이 있다. 이러한 소프트웨어의 특징은 다양한 환경의 영향을 고려하여 적외선 영상을 획득할 수 있다. 또한 표적의 인식 및 추적 알고리즘 개발을 비롯한 표적의 다양한 재질의 영향을 고려하는 적외선 특성 연구에 활용될 수 있다. 적외선 영상 생성 소프트웨어를 보다 정확한 예측을 수행하기 위해서 필요한 정보로는 대기투과도 및 태양복사에너지 등이 있다. 대기투과 모델 프로그램인 LOWTRAN7<sup>[6]</sup> 및 MODTRAN4<sup>[7]</sup>는 태양으로부터 지구로 입사되는 태양복사에너지가 대기층을 통과할 때 흡수, 투과 및 산란으로 인한 대기투과도 및 태양 복사에너지를 계산할 수 있다.

본 논문에서는 물체의 광학적 표면 특성에 따라 다르지만 일반적으로 IR 신호 중 약 70~80%에 해당되는 물체 자체에서 방출되는 복사에너지를 계산하기 위해서 필요한 물체의 표면온도를 계산하는 S/W의 검증 작업으로 현재 국방과학연구소에서 운용 중인 검증된 SE-Workbench-IR(프랑스)<sup>[8]</sup>과 비교하였다. 특히 물체의 표면온도를 정확하게 계산하기 위해서는 측정된 태양복사에너지, 풍향, 풍속 및 대기온도를 이용해야 하지만 SE-Workbench-IR의 경우 지구 지표면까지 도달되는 태양복사에너지를 대기투과모델 프로그램인 MODTRAN에서 계산된 데이터를 활용해야 된다. 따라서 본 논문에서는 태양복사에너지는 MODTRAN에서 계산된 데이터를 활용하였고 풍향, 풍속 및 대기온도는 과거 기상청에서 측정된 자료를 활용하였다.

## 2. 표면온도 해석 기법

### 가. 에너지 보존 방정식

표면온도를 해석하기 위하여 식 (1)과 같은 지배방정식을 이용하였으며 SE-Workbench-IR과 마찬가지로 1차원 열전달을 고려하여 해석하였다.

$$MC_p \frac{\partial T}{\partial t} = Q_{conduction} + Q_{convection} + Q_{irrad} - Q_{emit} \quad (1)$$

여기서, 왼쪽 항은  $M$ 과  $C_p$ 는 각각 물체의 질량과 비열이며  $T$ 는 물체의 표면온도,  $t$ 는 시간을 나타낸다. 오른쪽 항은 첫 번째부터 각각 전도, 대류, 태양복사열전달 및 물체에서 방출되는 에너지를 나타낸 것으로 식 (1)과 같이 에너지 보존 방정식을 이용하여 물체의 표면온도를 계산할 수 있다.

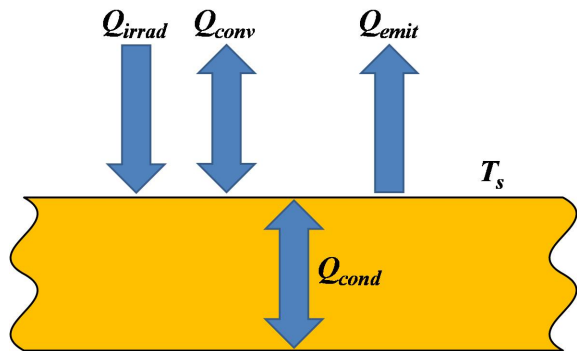


Fig. 1. 물체 표면의 열평형 조건

### 나. 전도 열전달

물체내부에서의 전도 열전달은 열 저항이 상대적으로 작은 물체의 깊이 방향으로만 발생하는 것으로 가정하여도 큰 문제가 없는 것으로 보고 있다. 따라서 인접하는 깊이 방향 요소  $j$ 로부터 요소  $i$ 로 전달되는 전도 열전달은 다음 수식으로 표현할 수 있다.

$$Q_{cond} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N k_{ij} A_{i,o} \frac{T_j - T_i}{l_{ij}} \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 인접하는 요소의 수를 나타내며 표면 요소의 경우  $N=1$ , 내부 요소의 경우  $N=2$ 가 된다.  $A_{i,o}$ 는 요소  $i$ 의 면적,  $l_{ij}$ 는 두 요소들 사이의 거리이

며,  $k_{ij}$ 는 열전도계수를 나타낸다. Fig. 2에 1차원 전도열전달에 대한 격자 구성 방법을 설명하고 있다.

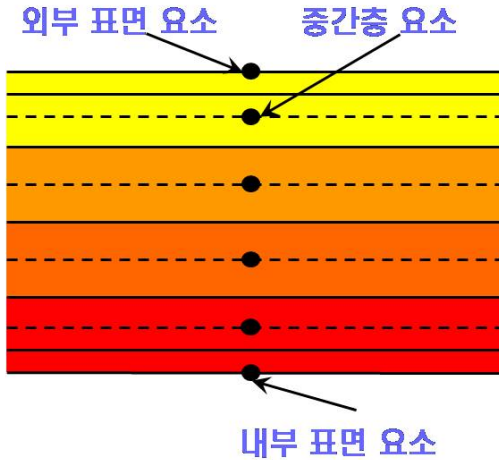


Fig. 2. 1차원 과도 열전도 모델

다. 대류 열전달

본 연구에서 고려된 대류 열전달은 Newton의 냉각 법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{conv} = hA_{i,o}(T_{\infty} - T_i) \quad (3)$$

여기서,  $A_{i,o}$ 는 대기와의 접촉면적,  $h$ 는 대류 열전달 계수,  $T_{\infty}$ 는 대기온도를 나타낸다.

라. 태양복사에너지

태양에너지는 열전달 모체가 없는 우주 공간을 지나기 때문에 지구에는 복사에너지의 형태로 전달되며, 복사에너지가 지표면에 도달되는 형태에 따라서 두 가지로 구분된다. 첫째 태양의 복사에너지가 대기권에서 산란, 굴절, 편광 되지 않고 지표면에 곧바로 도달되는 직사성분(direct component)과 둘째 지구의 대기권에서 수분, 공기 입자, 공해 물질에 의해서 산란된 형태의 무 방향성 복사에너지인 확산성분(diffuse component)으로 나눌 수 있다. 이러한 두 가지 형태의 성분을 합친 값이 전체 일사량이라 할 수 있다. 따라서 본 연구에서 고려된 태양 복사 ( $Q_{irrad}$ )는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_{irrad} = \alpha_{ss} A_{i,o}(q_{solar,direct} + q_{solar,diffuse}) \times \hat{n} \quad (4)$$

여기서,  $\alpha_{ss}$ 는  $0.3 \sim 3\mu m$ 에서의 파장별 흡수율을 나타낸다.

1) 직사성분

물체에 도달되는 태양의 직사성분은 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있으며 본 연구에서는 대기투과 모델 프로그램 MODTRAN을 이용하여 계산하였다.

$$q_{solar,direct} = \int_0^3 \tau_i(\lambda) \cdot I_{solar,direct}(\lambda) \cos\theta_s d\lambda \quad (5)$$

여기서,  $I_{solar,direct}(\lambda)$ 는 지구 대기권 밖에 도달되는 태양복사에너지,  $\theta_s$ 는 태양의 천정각,  $\tau_i(\lambda)$ 는 태양과 물체 사이에 존재하는 대기투과도이다.

2) 확산성분

물체에 도달되는 태양의 확산성분은 다음의 식을 이용하여 계산할 수 있으며 본 연구에서는 대기투과 모델 프로그램 MODTRAN을 이용하여 계산하였다.

$$q_{solar,diffuse} = \int_0^3 \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} \tau_i(\lambda) \cdot I_{solar,diffuse}(\lambda, \theta, \phi) d\theta d\phi d\lambda \quad (6)$$

여기서,  $I_{solar,diffuse}(\lambda, \theta, \phi)$ 는 파장별 태양의 확산성분,  $\theta$ 와  $\phi$ 는 하늘을 반구라고 가정하여 나타낸 천정각 및 방위각을 나타낸다.

3. 태양복사 및 기상조건

본 논문에서 고려된 인자는 태양복사에너지, 풍향, 풍속 및 대기온도이다. 물체의 표면온도에 가장 영향을 많이 미치는 태양복사에너지의 경우 SE-Workbench-IR 프로그램에서 실측된 데이터를 입력할 수 없기 때문에 국내외적으로 많이 사용하고 있는 대기투과모델 프로그램 MODTRAN을 이용하였다. 그리고 풍향, 풍속 및 대기온도의 경우에는 기상청에서 제공받으며 겨울의 경우에는 2008년 1월 1일 12시~2일 11시, 여름의 경우에는 2007년 7월 1일 12시~2일 11시이다.

가. 태양복사에너지

대기투과 프로그램 MODTRAN은 대기에 의해서 발생하는 복사, 투과 및 산란 특성이 지역마다 서로 다른 분포를 보이기 때문에 열대(북위 15°) 대기 모델, 중위도(북위 45°) 여름/겨울 대기 모델, 극위도(북위 60°) 대기 모델 및 미국의 표준 대기 모델을 포함하고 있다. 한반도 및 주변지역의 대기 모델에 가장 적합한 것으로는 중위도 여름 및 겨울 대기 모델이다. Fig. 3은 MODTRAN의 중위도 겨울 및 여름 대기 모델을 이용하여 수직거리 100km 상공에서 지상을 바라보았을 때의 대기투과도를 나타내었다. 본 논문에서 나타낸 대기투과도는 태양과 물체사이에 존재하는 대기를 말하며 지표면에 도달되는 태양복사에너지를 결정하는 매우 중요한 인자이다. 또한 MODTRAN 프로그램을 이용하여 물체와 센서사이에 존재하는 파장별 대기투과도를 계산할 수 있으며 이 인자는 센서로 들어오는 적외선 신호를 계산하는 데 반드시 필요하다. 선진국에서 개발된 적외선 영상 생성 소프트웨어 중 약 90% 이상이 MODTRAN을 사용하여 적외선 신호를 분석하고 있다<sup>[9]</sup>.

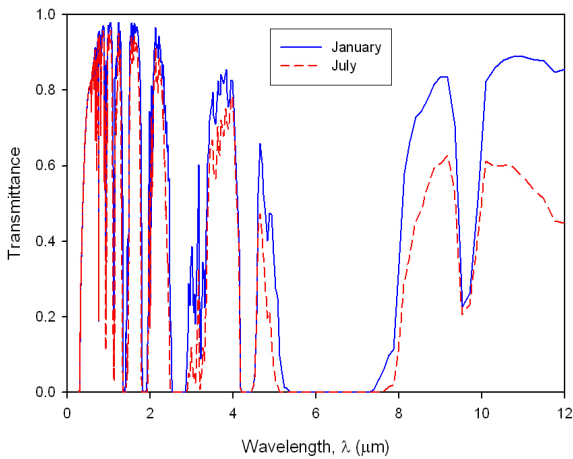


Fig. 3. 중위도 지방의 대기투과도(수직거리 100km)

태양복사는 복사열전달에 의해 우주 공간을 지나 지구에 도달한다. 태양상수는 약  $1353W/m^2$ 로 매질이 없는 우주 공간에서는 그대로 지구까지 도달하지만, Fig. 3과 같이 대기투과도에 의해서 대기권을 통과하여 지표면에 도달할 때는 대기의 참여 매체인  $H_2O$ ,  $O_3$ ,  $N_2O$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $NO$ ,  $NO_2$  등에 의하여 흡수되고 나머지만 도달한다. Fig. 4에 MODTRAN4를 이용

하여 계산한 1월과 7월의 시간별 태양복사에너지를 나타내었다.

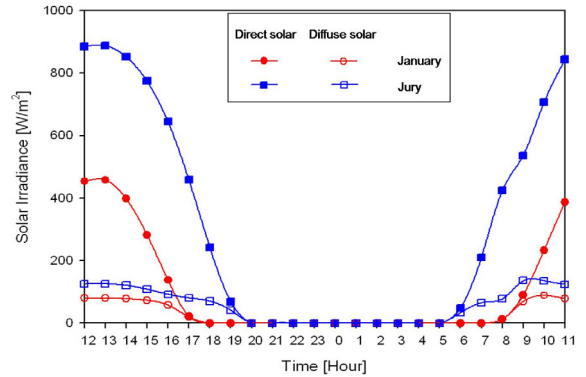


Fig. 4. 시간에 따른 태양복사에너지

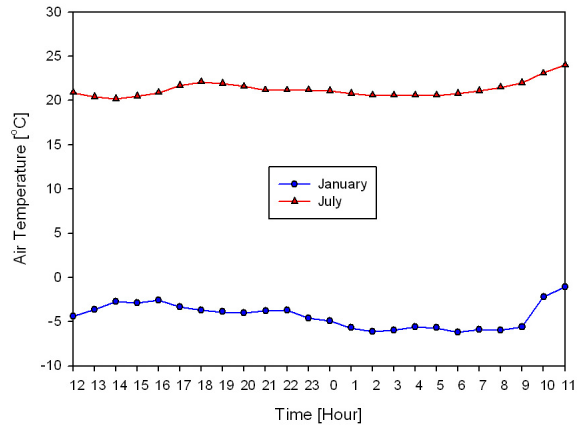


Fig. 5. 시간에 따른 대기온도 분포

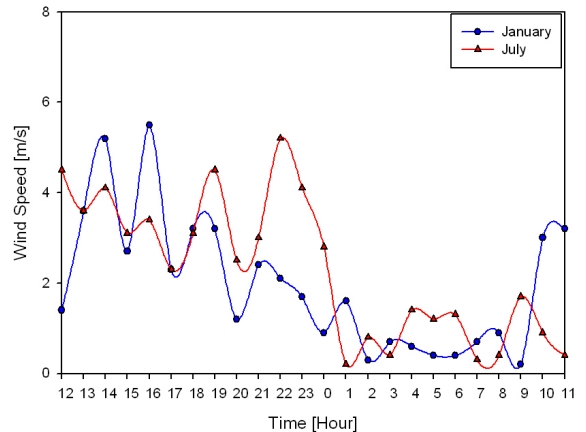


Fig. 6. 시간에 따른 풍속 분포

나. 기상조건

본 논문에서 물체의 표면온도를 계산하기 위하여 고려된 기상조건은 풍향, 풍속 및 대기온도이며, 기상청에서 대전 지역을 측정된 데이터를 이용하였으며 Fig. 5~7에 각각 나타내었다.

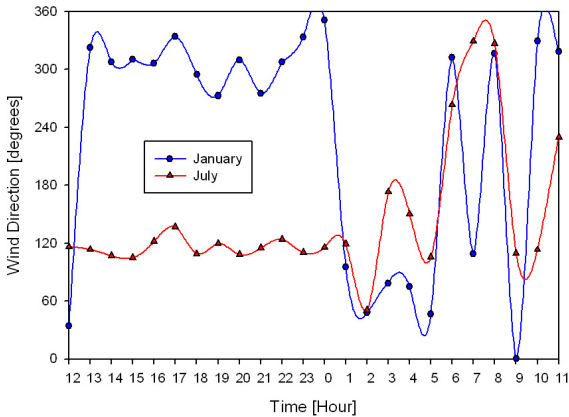


Fig. 7. 시간에 따른 풍향 분포(북풍 0°, 동풍 90°)

4. 적용조건

본 논문에서 물체의 표면온도를 계산하기 위하여 고려된 물체의 지리적 정보 및 물체의 재질 정보를 Table 1, 2에 나타내었다. 고려된 물체는 깊이 방향으로 1가지 및 3가지 다른 재질로 구성되어 있다. 따라서 물체의 표면온도를 계산하기 위해서 각각의 재질을 고려하여 표면온도에 해당되는 재질1의 온도를 계산하였다.

Table 1. 지리적 정보

위치	위도	경도
대전, 대한민국	36.2N	127.26E

5. 표면온도 해석 결과

물체의 표면온도 분포도는 1월과 7월 11시에 대하여 나타냈으며 11시의 표면온도를 계산하기 위해서 이전 24시간 동안의 태양복사에너지 및 기상자료(Fig. 4~7)를 활용하였다. 물체의 방향은 방위각(시계방향

Table 2. 물체의 재질 정보

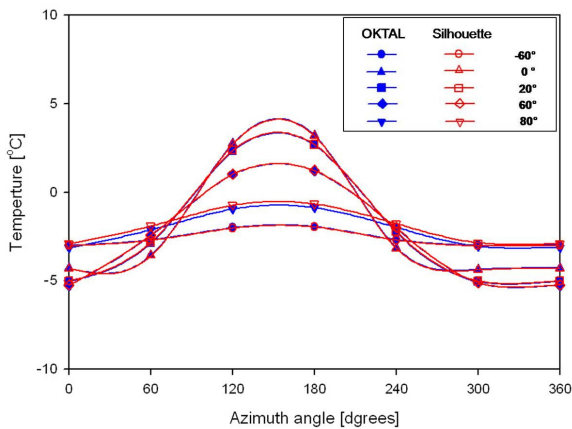
		Sand	Concrete	Metal
재질1	열전도율 (W/mK)	0.2636	1.046	71.9650
	비열 (J/kgK)	795.0	656.90	447.70
	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	1650.0	2300.0	7870.0
	흡수율	0.55	0.9	0.87
	두께	∞	0.01	0.02
재질2	열전도율 (W/mK)	-	0.334720	0.125520
	비열 (J/kgK)	-	656.90	1423.0
	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	-	1600.0	1050.0
	흡수율	-	0.668140	0.5
	두께	-	0.3	0.1
재질3	열전도율 (W/mK)	-	0.125520	71.965
	비열 (J/kgK)	-	1423.0	447.7
	밀도 (kg/m <sup>3</sup> )	-	1050.0	7870.0
	흡수율	-	0.5	0.32
	두께	-	0.05	0.02

으로 60° 간격)과 고도각(-60°, 0°, 20°, 60°, 80°)의 변화에 따른 온도 분포도를 나타냈다.

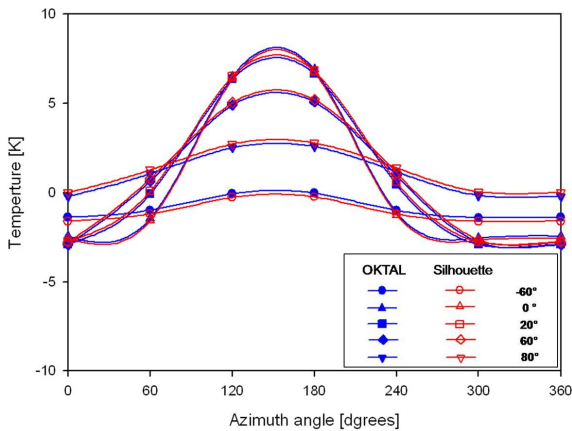
가. 겨울 (1월)

본 논문에서는 기상청에서 제공받은 1월의 기상조건(태양복사에너지, 대기온도, 풍향, 풍속)을 이용하여 물체의 표면온도를 계산하였으며 계산결과를 Fig. 8에 나타내었다.

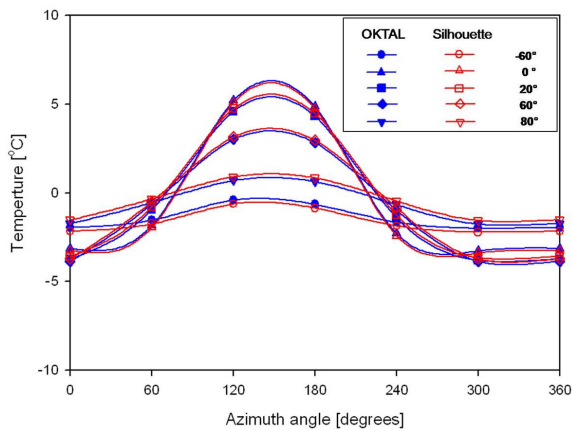
겨울은 기후적인 특색에 의해서 대기온도가 매우 낮기 때문에 물체의 표면온도가 매우 낮게 나타나며 특히 계산된 시간은 11시이기 때문에 물체의 방향에 따라서 표면온도가 다르게 나타난다. 태양의 위치는



(a) Sand



(b) Concrete



(c) Metal

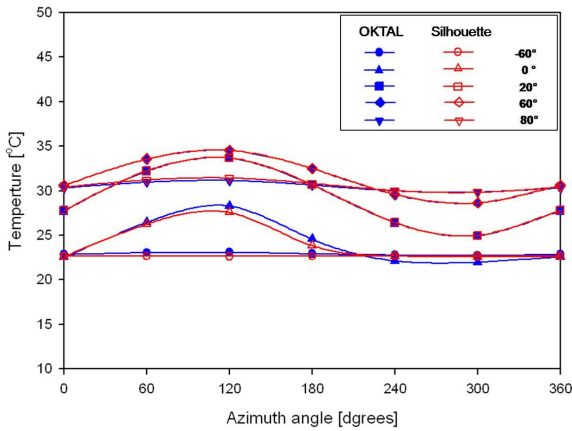
Fig. 8. 표면온도 분포도(1월, 11시)

고도각 26.63°, 방위각 155.727°이며 표면온도 분포도를 살펴보면 고도각 0°에서 20°, 방위각 120에서 180° 사이의 온도가 가장 높게 나타남을 확인할 수 있다. 분석 결과 콘크리트 및 메탈의 1월 표면온도 분포는 SE-Workbench-IR(OKTAL) 및 Silhouette에서 계산된 결과가 거의 비슷하게 나타났다. 최대 온도 차이는 지구의 지면을 대표하는 Sand의 경우에는 0.36°C의 차이를 보였으며 3가지의 복합재질로 구성되어 있는 콘크리트의 경우에는 약 0.63°C, 메탈의 경우에는 약 0.84°C의 차이를 보였다. 그 이유는 SE-Workbench-IR의 경우 입력조건이 제한적이며 MODTRAN에서 계산된 태양복사에너지의 값에서 오차가 발생했다고 볼 수 있다. 그러나 일반적으로 표면온도 측정 시 나타날 수 있는 온도 센서의 오차(0.1~2°C)에 해당되며 따라서 자체적으로 검증작업이 이루어진 프랑스에서 개발된 SE-Workbench-IR과 중앙대학교에서 개발한 Silhouette의 계산결과가 거의 같다고 볼 수 있다.

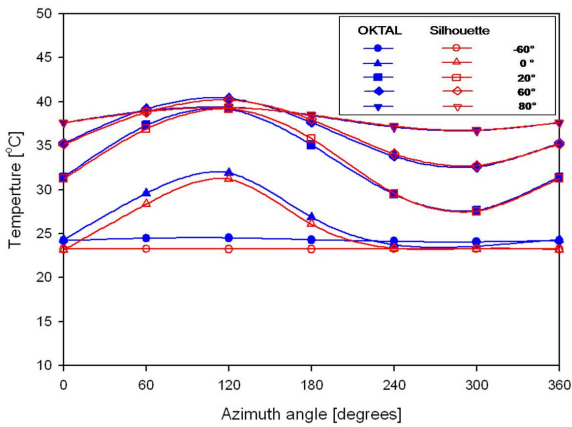
#### 나. 여름 (7월)

본 논문에서는 기상청에서 제공받은 7월의 기상조건(태양복사에너지, 대기온도, 풍향, 풍속)을 이용하여 물체의 표면온도를 계산하였으며 계산결과를 Fig. 9에 나타내었다.

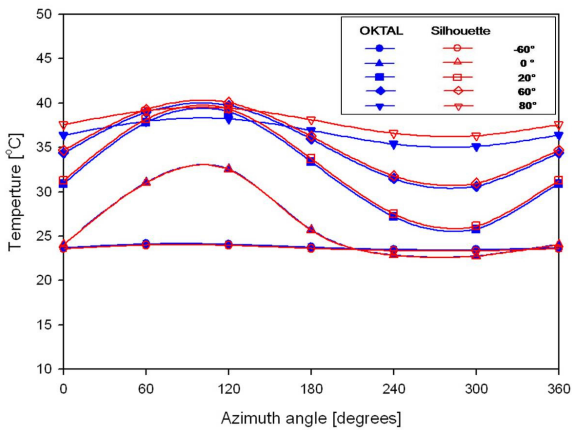
여름은 기후적인 특색에 의해서 대기온도 및 태양복사에너지가 매우 높기 때문에 물체의 표면온도가 매우 높게 나타나며 특히 고려된 시간은 11시이기 때문에 물체의 고도각 및 방위각에 따라서 표면온도가 다르게 나타난다. 태양의 위치는 고도각 65.61°, 방위각 116.641°이며 표면온도 분포도를 살펴보면 고도각 60°, 방위각 120에서 온도가 가장 높게 나타남을 확인할 수 있다. 분석 결과 콘크리트 및 메탈의 7월 표면온도 분포는 SE-Workbench-IR(OKTAL) 및 Silhouette에서 계산된 결과가 거의 비슷하게 나타났다. 최대 온도 차이는 각 재질별로 분석하면 다음과 같다. 지구의 지면을 대표하는 Sand의 경우에는 0.46°C의 차이를 보였으며 3가지의 복합재질로 구성되어 있는 콘크리트의 경우에는 약 0.93°C, 메탈의 경우에는 약 1.24°C의 차이를 보였다. 그 이유는 SE-Workbench-IR의 경우 입력조건이 제한적이며 MODTRAN에서 계산된 태양복사에너지의 값에서 오차가 발생했다고 볼 수 있다. 그러나 일반적으로 표면온도 측정 시 나타날 수 있는 온도 센서의 오차(0.1~2°C)에 해당되며 따라서 자체적으로 검증작업이 이루어진 프랑스에서 개발된 SE-



(a) Sand



(a) Concrete



(a) Metal

Fig. 8. 표면온도 분포도(7월, 11시)

Workbench-IR과 중앙대학교에서 개발한 Silhouette의 계산결과가 거의 같다고 볼 수 있다.

## 6. 결론

다양한 기상조건을 고려한 물체의 표면온도를 해석하여 IR 신호를 예측할 수 있는 Silhouette 소프트웨어를 개발하고 있으며 IR 신호 중 재질의 광학적 특성에 따라서 다르지만 일반적으로 가장 높게 나타나는 물체 자체에서 방출되는 복사에너지를 계산하기 위하여 가장 중요한 표면온도를 검증하는 작업을 실시하였다. 본 연구에서 개발된 소프트웨어와 프랑스에서 개발하여 현재 국방과학연구소에서 운용 중인 SE-Workbench-IR(OKTAL)과 비교한 결과 매우 유사한 표면온도 계산 결과가 나타남을 확인하였다. 본 연구에서는 원거리에 위치하고 있는 센서가 매우 큰 물체를 탐지한다고 가정하였기 때문에 1차원 과도 열전도를 이용하여 표면온도를 계산하였다. 하지만 근거리에 위치하고 있는 센서가 물체를 본다고 가정하면 3차원 열전도를 고려하여 표면온도를 계산하여야 한다. 또한 내부 열원이 존재하는 경우에도 필요하다. 따라서 향후에는 본 연구에서 개발된 소프트웨어를 추가적으로 보완할 계획이며 파장별 IR 신호를 계산하여 적외선 영상을 획득할 수 있는 소프트웨어를 개발할 예정이다. 마지막으로 개발된 소프트웨어를 추가적으로 검증하기 위하여 다양한 형상 모델을 제작하여 실측된 데이터와 검증할 계획이다.

## 후 기

이 논문은 2008년도 중앙대학교 연구 장학 기금지원에 의한 것입니다.

## Reference

- [1] Jun-Hyuk Choi and Tae-Kuk Kim, "Analysis of the Spectral Surface Radiance by using the Surface BRDF and the Atmospheric Transmission Effects", Proc. SPIE, Vol. 7017, 2008.
- [2] Neil W. Scanlan, John R. Schott and Scott D. Brown,

- “Performance Analysis of Improved Methodology for Incorporation of Spatial/Spectral Variability in Synthetic Hyperspectral Imagery”, SPIE Imaging Spectrometry IX, Vol. 5159, pp. 319~330, 2003.
- [3] David A. Vaitekunas, “Validation of ShipIR(v3.2) : Methodology and Results”, SPIE Targets and Backgrounds XII, 2006.
- [4] Cathala, T., Goff, A. L., Gozard, P., Latger, J., “Realtime Simulation Tools in the CHORALE Workshop”, Proc. SPIE, Vol. 6239, 2006.
- [5] Jeffrey S. Sanders, “Ground Target Infrared Signature Modeling with the Multi-Service Electro-optic Signature(MuSES) Code,” Proc. SPIE, Vol. 4029, 2000.
- [6] Neizys, F. X., E. P. Shettle, L. W. Abreu, J. H. Chetwynd, G. P. Anderson, W. O. Gallery, J. E. A. Selby and S.A. Clough, “Users Guide to LOWTRAN7”, AFGL-TR-88-0177, Environment Research Papers, No. 1010, 1988.
- [7] Acharya. P. K., Berk. A., Anderson. G. P., Larsen. N. F., Tsay. S-Chee and Stammes. K. H., “MODTRAN4 : Multiple Scattering and Bi-Directional Distribution Function(BRDF) Upgrades to MODTRAN”, Proc. of SPIE, Vol. 3756, 1999.
- [8] Alain Le Goff, Thierry Cathala, “Automatic Temperature Computation for Realistic IR Simulation”, SPIE Proceedings, Vol. 4029, April 2000.
- [9] 신종진, “동아시아 표준 대기가 합성 적외선 영상에 미치는 효과,” 한국군사과학기술학회지 제9권, 제4호, pp. 97~103, 2006.