



달 표면온도 예측을 위한 집중계 해석방법과 하부 열유속 모델의 적용

김택영¹

Lumped System Analysis on the Lunar Surface Temperature Using the Bottom Conductive Heat Flux Model

Taig Young Kim¹

Department of Mechanical Engineering, Korea Polytechnic University

ABSTRACT

Instead of securing thermophysical properties throughout the entire lunar surface, a theoretical method to predict the lunar surface temperature accurately using improved Lumped System Model (LSM) was developed. Based on the recently published research, thermal mass per unit area at the top regolith layer is assumed uniform. The function of bottom conductive heat flux was introduced under the theoretical background. The LSM temperature prediction agrees well with the DLRE measurement except for dusk, dawn and high latitude region where the solar irradiation is weak. The relative large temperature discrepancy in such region is caused by the limit of the bottom conductive heat flux model. The surface temperature map of the moon generated by the LSM method is similar to the DLRE measurement except for the anomalous temperature zones where surface topography and thermophysical properties appear in highly uneven.

초 록

달 표면 전체에 걸쳐 열물성치를 확보하는 대신 단위 면적당 열질량을 이용하여 달 표면온도를 정확히 예측할 수 있는 개선된 집중계(Lumped System Model, LSM) 해석방법을 제시하였다. 최근에 발표된 연구에 기초하여 표토층 최상단의 단위 면적당 열 질량이 균일하다고 가정하고, 하부면 전도열유속 방정식을 이론적인 근거 하에 도입함으로써 DLRE 측정온도와 상당한 정도 잘 일치하는 달 표면의 온도지도도를 구하였다. LSM 온도예측은 태양복사가 약한 황혼, 새벽 및 고위도 지역을 제외하면 DLRE 측정과 잘 일치하며, 이러한 지역에서의 온도 불일치는 하부 전도열유속 모델의 한계에 기인한다. 표면 지형과 열물성치가 매우 불균일한 지역에서 나타나는 비정상온도 영역을 제외하고 LSM 분석으로 생성된 달 표면 온도지도도는 DLRE 측정 결과와 유사하다.

Key Words : Lunar Surface Temperature(달 표면온도), Lumped System Model(집중계), Bottom Conductive Heat Flux(하부 전도열유속)

† Received : October 11, 2018 Revised : November 20, 2018 Accepted : November 21, 2018

¹ Professor

¹ Corresponding author, E-mail : tagikim@kpu.ac.kr, ORCID 0000-0002-7602-4397

I. 서 론

달 표면 온도는 달 주위의 열 환경과 표토층 내부의 열 조건에 의해 결정된다. 달 표면의 희박한 대기로 인하여 대류열전달을 무시할 수 있으므로, 태양입사와 표면 적외선(IR) 방사 및 표면에서 표토층 내부로의 열전도만이 달 표면 온도의 결정에 기여한다. 또한, 낮에는 태양에 대한 달 공전주기가 매우 길고 태양복사가 상대적으로 크기 때문에 태양복사와 IR 방사가 달 표면 온도를 조절하는 주요 요인이 된다. 밤에는 태양복사가 없으므로 표토층 내부로의 열전도가 태양복사를 대체하고 IR 방사와 더불어 표토층의 열관성이 냉각 속도를 제어한다. 태양 입사각이 큰 해질녘과 새벽에는 태양복사와 열전도 및 열관성을 모두 무시할 수 없으며 결과적으로 이들이 모두 온도에 큰 영향을 미친다.

열관성은 온도변화에 저항하는 동적 성능을 나타내며 밀도, 비열 및 열전도도와 같은 열물성치에 따라 결정된다. 달 표면을 덮고 있는 얇은 표토층은 미세입자로 구성된 다공질로써 열전도도가 매우 낮지만, 개별 표토입자의 밀도와 비열은 지구의 암석과 비슷하다[1]. 다공질의 특성으로 인해 태양복사는 표토 최상층의 일정 깊이까지 침투하며 표면층의 에너지 균형에 직접 기여한다. 기존 연구에서 이러한 태양복사의 침투량은 optically thick limit[2]에 기초한 전도열전달의 일부로 다루어졌으며, 온도의 3층에 비례하는 유효 열전도도를 도입하여 고려하였다[1]. 달 표토층의 수학적 해석에 대한 대부분의 연구[3,4,5]에서 이러한 유효 열전도도를 적용하였으며, 다만 이에 포함된 계수를 다른 값을 사용하였다. 아폴로 착륙지점의 측정자료 분석을 통하여 표토층의 밀도는 깊이 방향으로 변하는 함수이며 최상층은 거의 일정한 밀도를 갖는다[3,4,5]. 한편, 비열은 온도의 함수로써 몇몇 공식이 개발되었다[6,7]. 이러한 달 표토층의 열물성치는 제한된 착륙지점의 측정자료에 국한된다.

달 표면 온도를 수학적으로 계산하려는 연구가 발표된 바 있으며[3,5], 달 착륙지점을 기준으로 해석한 온도의 정확도는 달 탐사를 통한 측정자료와 비교함으로써 검증되었다. 특히, 2009년에 발사된 NASA의 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)[8]에 탑재된 Lunar Diviner Radiometer Experiment (DLRE)[9]에 의하여 측정된 온도자료는 거의 8년에 걸쳐 축적되었으며, Williams 등의 최근 연구[10]에서 DLRE 측정을 기반으로 달 표면 전체에 걸친 시간평균 및 순간 온도지도가 발표되었다. 이러한 노력을 통해 달 표면 온도특성에 대한 전반적인 이해가 증대되었다.

달은 완벽한 구가 아니며 표면 지형도 매끄럽지 않다. 또한, 열물성치도 표면에 걸쳐 균일하지 않다. 밀도, 비열 및 열전도도 등 달 표면온도를 수학적으로 예측하기 위하여 요구되는 표토층 열물성치는 기

술한 바와 같이 표토층 깊이와 국부 온도의 함수로써, 이러한 물성치 수식들은 제한된 달 착륙 지점의 자료분석에서 기인한다. 따라서 수학적으로 달 표면에 전체에 대한 온도지도를 재현하는 것은 거의 불가능하다. 불완전하지만 달 표면의 전체 온도지도를 해석하기 위한 시도가 수행되었으나[11], DLRE 측정 온도에 비하여 밤 동안 온도에서 큰 오차가 발생하였으며 개선의 필요성이 제기된 바 있다.

최근 발표된 연구에 DLRE 측정결과에 따르면[10] 순간표면온도는 경도방향으로 균일하며, 국부적으로 비정상온도가 발견된다. DLRE에 근거한 최근의 다른 연구[12]에서는 표토층 최상부의 입자가 달 표면 전체에 걸쳐 균일하다는 결론을 얻었다. 이러한 결과를 바탕으로 본 연구에서는 표토 최상층의 비열이 달 표면 전체적으로 균일하다고 가정하였다. 또한, 불완전하게 알려진 밀도와 비열을 제한적으로 사용하기 위하여 Kim 등[11]이 제시한 집중계 (Lumped System Model, LSM) 해석법을 도입하였다. LSM은 내부의 온도구배를 무시할 수 있을 정도로 열전달의 길이 스케일이 작은 경우 유용하다. LSM 온도는 최상층의 얇은 퇴적층에 대한 에너지 방정식을 적분함으로써 정의된다. LSM 해석에서는 매우 얇은 표토층이 대상이므로, 달 표면온도는 LSM 온도에 의해 대체된다. 열물성치의 깊이와 온도에 대한 의존성은 단위 면적당 열질량을 도입함으로써 함축적으로 나타낸다. LSM 해석에서 가장 중요한 하부전도열유속에 대한 수학적 표현은 지배방정식의 정성적인 평가를 통하여 도출되었다. 최종적으로 모델의 계수와 단위 면적당 열질량은 DLRE 측정온도에 가장 근접하는 해석온도를 기준으로 추출하였다. 본 연구는 Kim 등[11]의 연구에서 문제가 되었던 하부 전도열유속 모델을 정립하여 적용함으로써 이들의 결과에 비하여 상당히 개선된 결과를 제시할 수 있었다.

다양한 위도에 대한 LSM 해석온도는 Williams 등[10]에 의해 발표된 DLRE 측정결과와 잘 일치한다. 하부 열유속 모델을 구성함에 있어 상대적으로 물리적인 특성을 고려하지 못한 지역, 즉, 태양복사가 약해지는 황혼과 새벽 및 고위도 지역에서 비교적 큰 오차가 나타난다. 그러나 이 지역에서 DLRE 온도의 표준 편차는 LSM 온도와의 차이와 비슷하거나 더 크므로 LSM 온도 예측의 정확도가 어느 정도 적절하다. LSM을 수치적으로 해석하기 위하여 Runge-Kutta 방법을 사용하였다. 본 연구에서 제시한 방법은 기존 표토층 해석법의 한계인 열물성치 사용도 제한적이며, 수치해석의 효율성도 매우 높다.

비정상 표면온도가 나타나는 특정지역에 관하여는 본 연구에서 논의되지 않았다. Banfield 등[13] 및 Hu 등[14]의 연구에 의하면 주간의 비정상온도는 주로 달 표면 지형에 따른 태양입사각의 변화에 기인한다. 표면경사로 인하여 태양입사각이 커지면, 온도

는 정상 표면보다 낮다. 야간의 비정상온도는 열질량의 불균일에 기인한다. 열질량이 큰 암석지대에서는 상대적으로 온도강하가 느리며 온도는 정상표면보다 높다. Williams 등[10]의 DLRE 측정온도와 본 연구에서 제시한 LSM 해석법을 사용하여 달 표면의 상세한 지형과 암석지대의 열물성 등을 효과적으로 추정할 수 있을 것이다. 이러한 부차적인 연구를 통하여 달뿐 아니라 대기가 없는 태양계 내의 행성의 열적 균형에 관한 포괄적인 이해에 도움을 줄 수 있을 것이다.

II. 지배방정식

2.1 집중계 해석모델 및 부차식

특정 깊이에서 표토층의 미소두께에 대한 에너지 방정식은 다음과 같이 일차원 비정상 전도열전달 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

이 식에서 좌표계 z 는 표면에서 달 중심을 향하는 깊이방향 좌표계이다. 밀도 ρ 는 깊이에 따른 함수 [3,4,5], 비열 c 는 온도의 함수 [6,15], 열전도도 k 는 온도와 깊이에 대한 비선형 함수로 알려져 있다 [7,16]. 식 (1)을 표토층 상층부의 매우 얇은 두께 d_s 까지 적분하여 다음과 같은 LSM 지배방정식을 유도한다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(c_s T_s) = \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{d_s} - \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_0 \quad (2)$$

식에서 두께평균인 LSM 온도 T_s 는 다음과 같이 정의하였다.

$$T_s \equiv \frac{\int_0^{d_s} (\rho c T) dz}{c_s} \quad (3)$$

두께 d_s 가 매우 얇다고 가정하였으므로 LSM 온도 T_s 는 표토층 표면온도와 같다고 가정할 수 있다. 또한, 단위 면적당 열질량 c_s 도 다음과 같이 LSM 층에 대한 평균 열물성치로 정의하였다.

$$c_s \equiv \int_0^{d_s} (\rho c) dz \quad (4)$$

LSM 지배방정식 (2)를 해석하기 위하여 구체적인 d_s 는 필요하지 않다. 식 (4)로 정의된 열질량은 열을 저장할 수 있는 잠재 능력이며 열질량이 증가하면 열관성도 증강된다. 본 연구에서는 LSM 해석을 위하여 요구되는 열질량이 최근 발표된 연구에 의거하여 달 표면 전체에 대하여 균일하다고 가정하였다 [10,

13]. Keihm [7]에 따르면, $z \leq 0.02\text{m}$ 인 최상 표토층의 밀도는 1250 kg/m^3 으로 거의 일정하다. Hemingway 등 [6]은 Apollo 11, 12, 14, 15, 16 임무에 의하여 측정된 자료에 근거하여 표토층의 비열을 분석하였으며, 온도에 대한 4차 다항식을 제안하였다. 달 표면 온도 범위는 약 $40 \sim 400\text{K}$ 이며, 밀도 1250 kg/m^3 인 최상층 표토층의 단위 면적당 열질량은 4차 다항식 형태인 비열을 적용하면 $2.7 \sim 21.3 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 추정할 수 있다. 따라서 c_s 의 초기 추정치는 최대값 및 최소값의 산술평균인 $12 \text{ kJ/m}^2 \cdot \text{K}$ 로 가정하였으며, DLRE 측정온도에 대한 최적값을 도출하였다.

식 (2)의 우변 첫째항은 LSM 하부면의 전도열유속으로써 수식을 간단히 나타내기 위하여 다음과 같이 정의하였다.

$$q_b = \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_{d_s} \quad (5)$$

식 (5)로 나타낸 하부 전도 열유속은 표토층 내부로부터의 지열과는 다르다. 달 내부 지열에 대한 자료는 아폴로 착륙지점의 자료분석을 통하여 약 $0.016 \sim 0.031 \text{ W/m}^2$ 로 알려져 있다 [15]. 그러나 이 값은 특정 지역에서 취득한 자료로써 달 표면 전 지역에 걸쳐 적용할 수 없다. 그러므로 본 연구에서는 지배방정식의 정성적인 분석을 통하여 q_b 의 수식형태를 제시하였으며, 이에 대하여는 다음 절에서 논하였다.

식 (2)의 우변 둘째항은 표토층 표면 $z=0$ 에서 표토층 내부로의 전도열유속으로 표면에서 에너지보존식을 적용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$-\left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right)_0 = q_s - \epsilon_{IR} \sigma T_s^4 \quad (6)$$

이 식에서 ϵ_{IR} 은 표토층 표면방사율로 0.95이며 [1], Stefan-Boltzmann 상수 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ 이다.

입사되는 태양복사의 흡수량에 해당하는 q_s 는 위치에 따라 변하는 입사각 ψ 의 함수로 다음 식과 같다.

$$q_s(\psi) = (1 - A_s) S f_s(\psi) \cos \psi \quad (7)$$

태양상수 S 는 평균값으로 1370 W/m^2 을 적용하였으며, $f_s(\psi)$ 는 낮 동안에만 태양입사가 존재하므로 다음과 같이 정의된 on/off 함수이다.

$$f_s(\psi) = \begin{cases} 1 & \psi \leq \pi/2 \\ 0 & \psi > \pi/2 \end{cases} \quad (8)$$

표면 Albedo A_s 는 Vasavada 등 [5]이 제시한 다음과 같은 수식을 적용하였다.

$$A_s(\psi) = 0.08 + 0.045 \left(\frac{4\psi}{\pi} \right)^3 + 0.14 \left(\frac{2\psi}{\pi} \right)^8 \quad (9)$$

태양입사각 ψ 는 위도 θ 와 경도 ϕ 로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\psi = \cos^{-1}(\sin\theta_s \sin\theta + \cos\theta_s \cos\theta \cos\phi) \quad (10)$$

이 식에서 달의 적도면과 황도면이 이루는 경사각 θ_s 는 달의 세차운동에 의하여 변하며, 이로 인하여 달에 계절이 발생한다. 그러나 경사각의 변화가 매우 작아서 극지역을 제외하면 거의 영향을 미치지 않는다. 본 연구에서는 $\theta_s = 1.54^\circ$ 로 가정하였으며, 달은 자전축이 경사각만큼 기운 상태로 자전하므로 북극 지역에는 항상 태양입사가 존재하고 남극지역은 태양입사 없는 겨울에 해당한다. 경도는 태양직하 경도선(정오)을 기준($\phi=0$)으로 정의한다. 달 표면 어떤 위치에서도 달 자전에 의하여 경도가 시간에 따라 변하며, 그 관계식은 다음과 같다.

$$\phi(t) = \frac{2\pi t}{t_M} + \pi \quad (11)$$

이 식에서 달의 자전주기는 $t_M = 2.360592 \times 10^6$ s이다. 달 표면의 일출과 일몰시간은 자전축의 경사각 때문에 위도에 따라 변한다. 기하학적인 형상을 고려한다면, 밤 길이에 해당하는 경도구간 $\Delta\phi_N$ 은 다음과 같이 경사각과 위도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\Delta\phi_N(\theta) = \begin{cases} 2\pi \\ 2\cos^{-1}(\tan\theta_s \tan\theta) \\ 0 \end{cases} \quad (12)$$

for $-\pi/2 \leq \theta < \theta_s - \pi/2$
for $\theta_s - \pi/2 \leq \theta < \pi/2 - \theta_s$
for $\pi/2 - \theta_s \leq \theta < \pi/2$

그러므로 밤의 경도범위는 $\phi_{ss}(\theta) \leq \phi \leq \phi_{sr}(\theta)$ 에 해당하며 일몰 및 일출 경도 $\phi_{ss}(\theta)$, $\phi_{sr}(\theta)$ 는 다음 식과 같다.

$$\phi_{ss}(\theta) = \pi - \frac{\Delta\phi_N(\theta)}{2}, \quad \phi_{sr}(\theta) = \pi + \frac{\Delta\phi_N(\theta)}{2} \quad (13)$$

달 표면의 태양입사지역과 암영지역은 Fig. 1에 도시한 바와 같다. 적도에서는 밤과 낮의 길이가 같으며 넓은 위도에 걸쳐 낮의 길이가 거의 일정하지만 북반구 고위도에서 낮의 길이가 급격히 길어지고 남반구 고위도에서는 급격히 감소한다. 북극지역 $\theta > \pi/2 - \theta_s$ 인 곳에서는 항상 태양입사가 존재하며, 남극 근처 $\theta < \theta_s - \pi/2$ 인 곳에는 태양입사가 없어서 항상 밤이다.

식 (5)와 (6)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 단순화된 포토층 LSM 지배방정식을 유도할 수 있다.

$$c_s \frac{dT_s}{dt} = q_b + q_s - \epsilon_{IR}\sigma T_s^4 \quad (14)$$

단위 면적당 열질량 c_s 는 기술한 바와 같이 전 표면에 걸쳐 일정하다고 가정하였다.

지배방정식 (14)는 온도에 대한 비선형 상미분 방정식으로 해석해를 구할 수 없다. 그러므로 4차항 정확도를 갖는 Runge-Kutta 방법[17]으로 수치적분하여 해를 구하였다. 초기조건 대신 태양직하 경도선에 대한 주기조건을 적용하였다. 한 위도에 대하여 해석시간은 3.4GHz CPU로 약 0.1s로 매우 짧아서 효율적인 방법임을 확인할 수 있다.

2.2 하부 열유속 모델

DLRE 측정온도에 대한 분석[10]과 수치해석적인

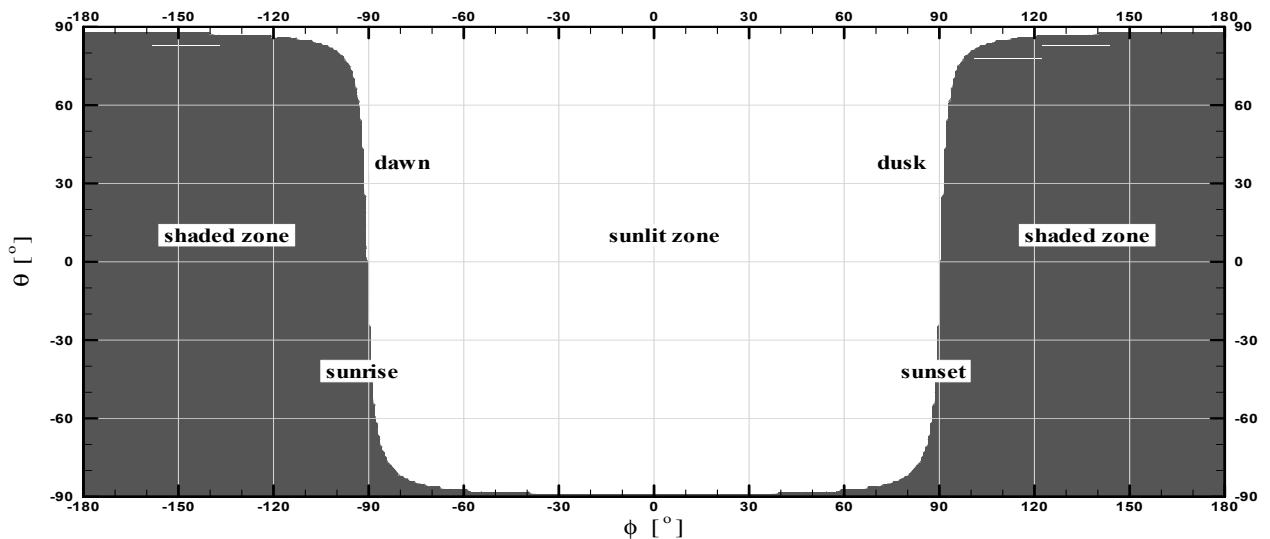


Fig. 1. Global map of the sunlit and shaded zones on the lunar surface ($\theta_s = 1.54^\circ$)

연구[5]에 의하면 태양직하 지역의 표면온도는 흡수되는 태양입사량과 표면방사로 방출되는 복사량의 균형에 의하여 결정된다고 보고된 바 있다. 그러므로 식 (14)에서 좌변의 열관성 효과는 무시할 수 있다. 이러한 가정을 태양입사가 존재하는 모든 지역에 적용하면 q_b 는 q_s 에 선형적으로 비례한다.

$$q_b(\psi) = a q_s(\psi) + b \quad (15)$$

정오와 일몰 및 일출경도에서 하부 전도열유속을 각각 다음과 같이 정오의 태양흡수열에 비례하는 값으로 가정하자.

$$\begin{aligned} q_b(\psi_0) &= -\alpha_0 q_s(\psi_0) \\ q_b(\psi_{ss}) &= \alpha_{ss} q_s(\psi_0) \\ q_b(\psi_{sr}) &= \alpha_{sr} q_s(\psi_0) \end{aligned} \quad (16)$$

한편, 밤 동안에는 태양입사가 없으므로 지배방정식 (14)는 온도에 대한 일계 상미분방정식이 된다. 일반적으로 이러한 방정식의 해는 지수함수 형태를 가지므로 밤 동안 q_b 는 다음과 같이 시간(또는 경도)에 대한 지수함수의 형태로 나타낼 수 있다.

$$q_b(\psi) = c e^{d\phi} \quad (17)$$

식 (15), (17)에 정오, 일몰, 일출조건인 식 (16)을 적용하면 다음과 같은 하부 전도열유속 식을 유도할 수 있다.

$$q_b(\psi) = \begin{cases} \alpha_{ss} q_s(\psi_0) - (\alpha_0 + \alpha_{ss}) q_s(\psi) \\ \alpha_{ss} q_s(\psi_0) \exp\left[\ln\left(\frac{\alpha_{sr}}{\alpha_{ss}}\right) \frac{\phi - \phi_{ss}}{\Delta\phi_N}\right] \\ \alpha_{sr} q_s(\psi_0) - (\alpha_0 + \alpha_{sr}) q_s(\psi) \end{cases} \quad (18)$$

for $0 \leq \phi < \phi_{ss}$
for $\phi_{ss} \leq \phi < \phi_{sr}$
for $\phi_{sr} \leq \phi < 2\pi$

계수 α_0 , α_{ss} 및 α_{sr} 은 DLRE 측정온도로부터 다음과 같이 구한다. 정오인 태양직하경도에서는 기술한 바와 같이 열관성을 무시할 수 있으므로 식 (14)에 식 (16)을 대입하면 다음과 같은 수식을 유도할 수 있다.

$$\alpha_0 = \frac{q_s(\psi_0) - \epsilon_{IR} \sigma T_{s,0}^4}{q_s(\psi_0)} \quad (19)$$

일몰과 일출경도에서는 태양복사가 0이므로 식 (14)에 식 (16)을 대입하면 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$\alpha_{ss} = \frac{c_s (dT_s/dt)_{ss} + \epsilon_{IR} \sigma T_{s,ss}^4}{q_s(\psi_0)} \quad (20)$$

Table 1. Coefficients of the bottom conductive heat fluxes and thermal mass per unit area

Evaluation Method	c_s [kJ/m ² K]	α_0 ($\times 10^3$)	α_{ss} ($\times 10^3$)	α_{sr} ($\times 10^3$)	$\overline{\Delta T}$ [K]
From DLRE measurement	12.01	52.00	26.20	23.30	21.34
Best curve fitting to DLRE measurement	14.04	55.13	7.44	3.35	3.49

$$\alpha_{sr} = \frac{c_s (dT_s/dt)_{sr} + \epsilon_{IR} \sigma T_{s,sr}^4}{q_s(\psi_0)} \quad (21)$$

계수 식들에서 하첨자 0, ss, sr은 각각 정오, 일몰 및 일출경도의 값을 의미한다. 이를 계산하기 위하여 적도의 DLRE 측정온도를[10] 이용하였다. 즉, 정오인 $\phi=0$, 일몰인 $\phi=\pi/2$, 일출인 $\phi=3\pi/2$ 에서 측정온도와 기울기를 대입하여 각 계수를 구하였으며, Table 1에 제시하였다. 이와 같이 구한 계수들은 $\theta \leq 70^\circ$ 인 저위도에 대한 DLRE 측정온도와 최소오차를 갖도록 다시 구하여 이를 최종적인 표면온도 예측에 적용하였다. 최적화된 계수들도 Table 1에 함께 제시하였다.

초기 적용한 계수와 최적화된 계수를 적용한 하부 전도열유속의 변화를 Fig. 2에 도시하였다. 한낮에는 상대적으로 q_b 의 두 수식 간에 오차가 적지만 일몰과 일출에 근접하며 오차가 증가함을 볼 수 있다. 이러한 오차는 q_b 가 q_s 에 선형적으로 비례한다는 가정에 기인한다. 정오 근처에서는 이러한 가정이 타당하지만 일몰 직전이나 일출 직후에는 태양복사가 약해져

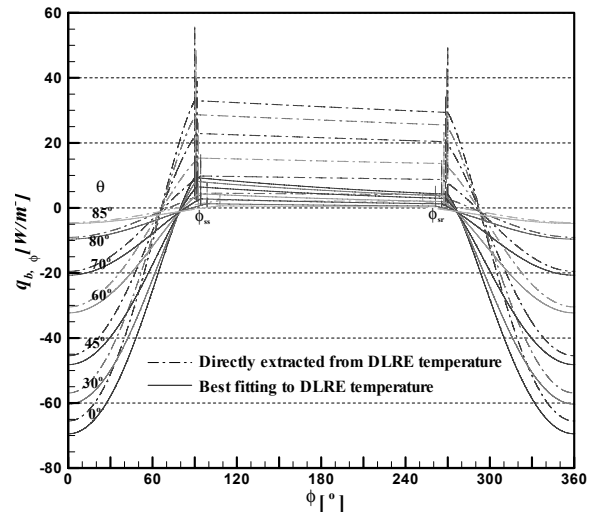


Fig. 2. Variations of the bottom conductive heat fluxes

서 열관성향을 무시할 수 없다. 본 연구에서 제시한 q_b 식은 이러한 지역에 대한 대응이 되어있지 않다. 밤 동안의 q_b 는 일몰과 일출에서 발생한 큰 차이로 인하여 초기에 적용한 수식이 최적화된 수식에 비하여 매우 큰 값을 나타낸다. 이는 수치해석으로 예측된 온도결과에 그대로 반영되어 나타나며, 결과의 검토부분에서 상세히 분석하였다. 정오지역에서 음으로 나타나는 것은 태양복사가 커서 표면층으로부터 하부면을 통하여 전도열이 방출됨을 의미한다. 일몰에 가까워지며 온도가 낮아지면 하부면을 통하여 전도열이 유입되므로 양이 된다. 일출 시 양인 값이 정오를 향하여 가면서 음으로 역전되는 현상도 같은 이유로 설명된다.

III. 결과분석 및 토의

적도의 온도를 사용하여 추출한 q_b 를 적용하여 지배방정식을 수치적으로 적분하였으며, 온도분포를 DLRE 측정결과와 함께 Fig. 3에 도시하였다. 고위도인 $\theta=85^\circ$ 를 제외하면 낮 동안의 온도분포는 DLRE 측정결과와 매우 잘 일치한다. 밤에는 전반적으로 온도가 높게 예측되며 오차도 상당히 크다. 이전 절에서 설명한 바와 같이 밤에는 q_b 가 과다하게 설정되었으며, 이에 따라 온도도 높아진다. 고위도인 $\theta=85^\circ$ 에서는 정오를 포함한 전 경도지역에서 태양복사가 약하므로 열관성에 대한 효과를 고려하지 못함에서 비롯한 오차가 발생하는 것으로 판단된다.

이와 같이 초기 적용한 q_b 를 보완하기 위하여 DLRE 온도에 최적화된 계수를 구하였다. 최적화는 반복계산을 통하여 $\theta=0, 30, 45, 60, 70^\circ$ 에서 DLRE 측정온도와 LSM 해석온도의 차이 $\Delta T_{ij}(=T_{DLRE,ij}-T_{LSM,ij})$ 의 평균값이 최소가 되도록 하였다. 평균 온도차는 다음 식으로 정의된다.

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N_\theta} \sum_j \left(\frac{1}{N_\phi} \sum_j \sqrt{\Delta T_{ij}} \right) \quad (22)$$

하첨자 i, j 는 계측된 온도를 표기한 지역의 경도와 위도를 각각 의미하며, 표기지역의 경도방향 총 개수는 $N_\phi=25$ 이고 위도방향 총 개수는 $N_\theta=5$ 이다. 최적화 시 c_s 에 대하여도 고려하였으며, 최종적으로 최적화된 값은 Table 1에 표기한 바와 같다. 최적화 전에 평균온도차가 21.34K이고 최적화 된 평균온도차는 3.49K로 상당한 정확도를 나타낸다.

최적화된 q_b 와 c_s 를 적용한 수치해석 결과를 Fig. 4에 도시하였다. 밤에도 온도가 DLRE 측정결과에 상당히 근접하고 있음을 볼 수 있다. 이러한 온도예측 결과는 Kim 등[11]이 예측한 LSM 결과에 비하여 상당히 개선되었음을 보여준다. Kim 등[11]의 이전 연

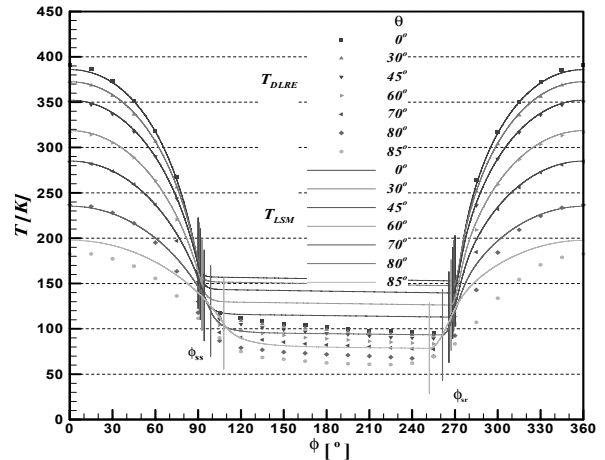


Fig. 3. Variations of lunar surface temperatures comparing the LSM prediction with the DLRE measurements (extracted from DLRE measurements)

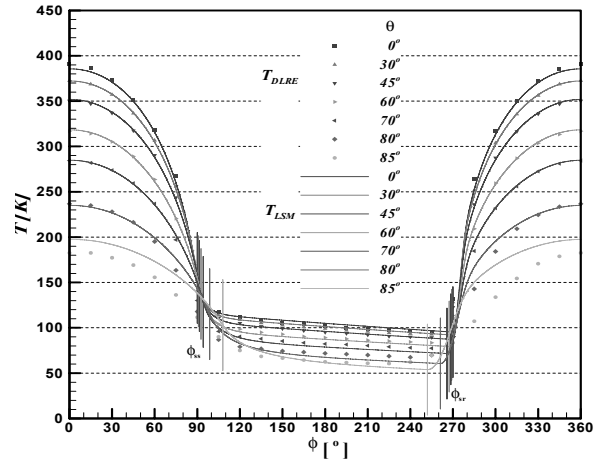


Fig. 4. Variations of lunar surface temperatures comparing the LSM prediction with the DLRE measurements (extracted from best curve fitting to DLRE measurements)

구에서는 하부 전도열유속을 달 내부로부터의 지열로써 $q_b=0.016\text{W/m}^2$ 으로 전체 달 표면에 대하여 일정하다고 가정하였으며, 단위 면적당 열질량 c_s 에 대한 최적화를 수행하였다. 이에 따라 LSM의 해석에 필요한 적절한 q_b 를 설정하지 못하였으며, 밤 동안 온도변화에서 큰 오차가 발생한 바 있다. 본 연구에서는 정성적인 측면에서 q_b 를 고찰하고 수학적 모델을 도입함으로써 이러한 문제를 해결하였으며, 정확도가 우수한 결과를 도출할 수 있었다.

LSM 온도와 DLRE 측정온도와 차이를 Fig. 5에 도시하였다. 태양입사가 존재하는 낮에는 $0^\circ < \phi < 60^\circ$ 와 $300^\circ < \phi < 360^\circ$ 인 범위에서, 밤 동안에는 전체에 걸쳐 온도오차가 매우 작고, DLRE 측정온도 표준편차보다 작거나 비슷한 수준이다. 일몰 직전의 석양과

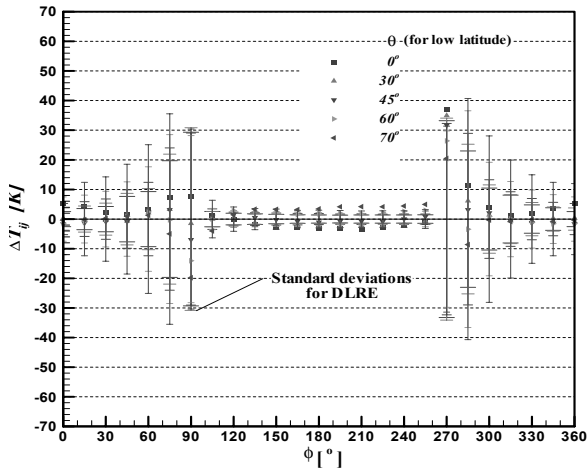
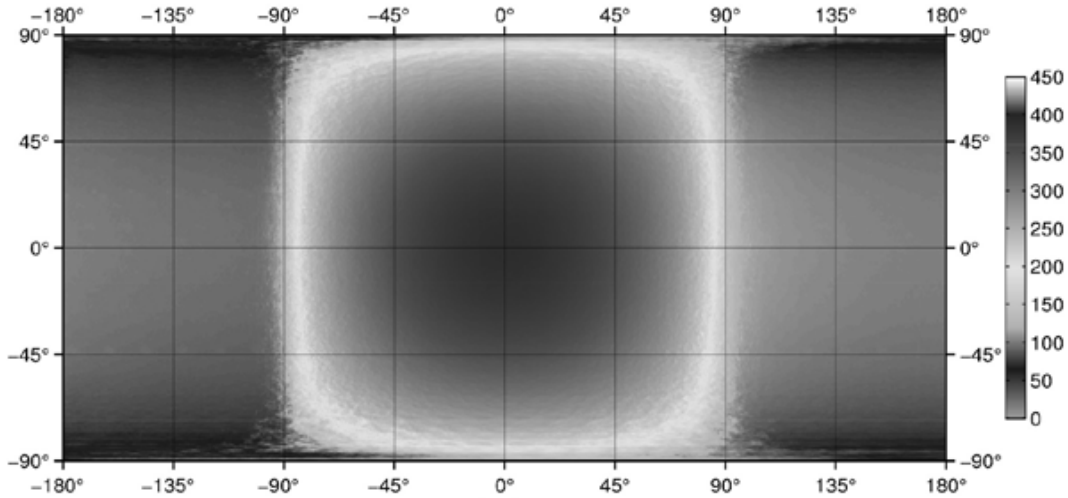


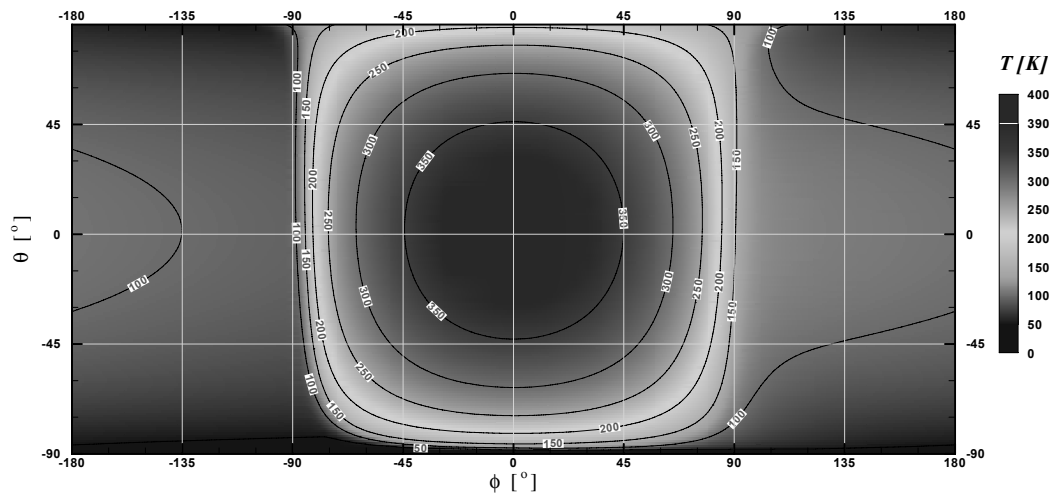
Fig. 5. Temperature discrepancies between the DLRE measurements and the LSM predictions

일출 직후의 새벽에서 온도편차가 크게 나타나며, 이는 기술한 바와 같이 q_b 모델의 한계에 기인하는 것으로 판단된다. 그러나 이 지역에서는 DLRE 측정온도의 표준편차도 상당히 커서 해석에서 발생하는 오차와 상응하는 정도이다.

본 연구에서 제시한 해석방법을 적용하여 전체 달 표면의 온도지도를 생성하였으며, 이를 Fig. 6에 도시하였다. DLRE 측정결과와 비교를 위하여 Fig. 6(a)에는 Williams 등[10]의 결과를 함께 제시하였다. 측정온도에서는 극부적으로 비정상 온도지역이 나타나지만 전반적인 온도분포가 일치함을 확인할 수 있다. 태양복사가 큰 낮에는 정오를 기준으로 대칭적인 온도분포가 나타나지만 냉각이 진행되는 밤에는 열관성에 의하여 온도의 대칭성이 깨진다. 적도의 정오에서 최고온도는 400K 가까이 상승하고 밤에는 고위도 지역에서 약 50K까지 냉각된다. 남극의 태양입사가 전혀 없는 지역에서 해석온도는 0K가 되며 이는 현



(a) Bolometric temperature map generated from DLRE measurements (Williams et al., 2017)



(b) Temperature map generated from LSM prediction
Fig. 6 Global temperature map over the lunar surface

실적이지 못하다. 태양입사가 하루 종일 존재하는 북극지역에서는 온도변화가 100~150K로 나타난다. 그러나 이러한 극지역의 온도는 표면의 경사도에 의하여 변화가 극심하게 나타나므로 지형변화를 고려한 연구보완이 필요하다.

수치해석으로 예측한 바와 같이 달 표면의 온도변화는 매우 극단적으로 변하므로 달 주위에서 임무를 수행하는 탐사위성이나 달 착륙선 및 월면차의 설계 시 열적으로 발생하는 문제점에 대하여 철저히 점검하고 대비하여야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구에서 제시한 개선된 LSM 해석방법은 달 표면 전체에 걸쳐 열물성치를 확보하는 대신 단위 면적당 열질량을 이용하여 달 표면 온도를 예측할 수 있는 효과적인 이론법이다. 최근에 발표된 연구에 기초하여 표토층 최상단의 단위 면적당 열질량이 균일하다고 가정하고, 하부면 전도열유속 방정식을 이론적인 근거 하에 도입함으로써 DLRE 측정온도와 상당한 정도 잘 일치하는 달 표면의 온도지도도를 구하였다. LSM 온도예측은 태양복사가 약한 황혼, 새벽 및 고위도 지역을 제외하면 DLRE 측정과 잘 일치하며, 이러한 지역에서의 온도 불일치는 하부 전도 열유속 모델의 한계에 기인한다. 표면 지형과 열물성치가 매우 불균일한 지역에서 나타나는 비정상온도 영역을 제외하고 LSM 분석으로 생성된 달 표면 온도지도도는 DLRE 측정 결과와 유사하다. 본 연구에서 제시한 LSM 해석방법은 매우 빠르고 정확하며, 따라서 DLRE 데이터를 사용하여 암석 지역의 열물성치를 조사하거나 표면지형의 기울기를 분석하는데 매우 효율적인 방법이 될 수 있을 것이다.

후 기

이 논문은 한국연구재단을 통해 과학기술정보통신부의 달탐사개발사업과(No. NRF-2017M1A3A9014633, No. NRF-2017M1A3A9032492) 교육부의 이공분야 대학중점연구소지원사업의 지원(NRF-2017R1A6A1A03015562)으로 수행되었다.

References

- 1) Cremers, C. J., "Thermophysical properties of lunar materials: Part II; Heat transfer within the lunar surface layer," *Advances in Heat Transfer*, Vol. 10, 1974, pp.39~83.
- 2) Siegel, R., and Howell, J., *Thermal Radiation Heat Transfer*, 4th ed. Taylor & Francis, 2002.

- 3) Bauch, K. E., Hiesinger, H., Helbert, J., Robinson, M. S., and Scholten, F., "Estimation of lunar surface temperatures and thermophysical properties: test of a thermal model in preparation of the MERTIS experiment onboard BepiColombo," *Planetary and Space Science*, Vol. 101, 2014, pp.27~36.
- 4) Grott, M., Knollenberg, J., and Krause, C., "Apollo lunar heat flow experiment revisited: A critical reassessment of the in situ thermal conductivity determination," *J. Geophys. Res.*, Vol. 115, 2010, E11005.
- 5) Vasavada, A. R., Bandfield, J. L., Greenhagen, B. T., Hayne, P. O., Siegler, M. A., Williams, J.-P., and Paige, D. A., 2012, "Lunar equatorial surface temperatures and regolith properties from the diviner lunar radiometer experiment," *J. Geophys. Res.*, Vol. 117, 2012, E00H18.
- 6) Hemingway, B. S., Robie, R. A., and Wilson, W. H., "Specific heats of lunar soils, basalt, and breccias from the Apollo 14, 15, and 16 landing sites, between 90 and 350K," *In: Proceedings of the Lunar Science Conference*, Vol. 4, 1973, pp.2481~2487.
- 7) Keihm, S. J., "Interpretation of the lunar microwave brightness temperature spectrum: Feasibility of orbital heat flow mapping," *Icarus*, Vol. 60, 1984, pp.568~589.
- 8) Chin, G., Brylow, S., Foote, M., Garvin, J., Kasper, J., Keller, J., Litvak, M., Mitrofanov, I., Paige, D., Raney, K., Robinson, M., Sanin, A., Smith, D., Spence, H., Spudis, P., Stern, S. A., and Zuber, M., "Lunar reconnaissance orbiter overview: the instrument suite and mission," *Space Sci. Rev.*, Vol. 129, 2007, pp.391~419.
- 9) Paige, D. A., et al., "The Lunar Reconnaissance Orbiter Diviner Lunar Radiometer Experiment," *Space Sci. Rev.*, Vol. 150, 2010, pp.125~160.
- 10) Williams, J. P., Paige, D. A., Greenhagen, B. T., and Stefan-Nash, E., "The global surface temperatures of the Moon as measured by the Diviner Lunar Radiometer Experiment," *Icarus*, Vol. 283, 2017, pp.300-325.
- 11) Kim, T. Y., Lee, J., Chang, S., Kim, J., Hyun, B., Cheon, H. Y., and Hua, H., "Mathematical Prediction of the Lunar Surface Temperature Using the Lumped System Analysis Method," *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 46, No. 4, 2018, pp.338~344.
- 12) Hayne, P. O., Bandfield, J. L., Siegler, M. A., Vasavada, A. R., Ghent R. R., Williams, J.-P., Greenhagen, B. T., Aharonson, O., Elder, C. L.,

Lucey, P. G., and Paige, A. D., "Global regolith thermophysical properties of the Moon from the Diviner Lunar Radiometer Experiment," *Journal of Geophysical Research*, 2017, pp.2371~2400.

13) Bandfield, J. L., Hayne, P. O., Williams, J.-P., Greenhagen, B. T., and Paige, D. A., "Lunar surface roughness derived from LRO diviner radiometer observations," *Icarus*, Vol. b248, 2015, pp.357~372

14) Hu, G. P., Zheng, Y. C., Xu, A. A., and Tang, Z. S., "Lunar surface temperature of global Moon: Preparation of database with topographic

and albedo effects," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, Vol. 13, 2016, pp.110~114.

15) Vaniman, D., Rudy, R., Heiken, G., Olhoeft, G., and Mendell, W., *The Lunar Environment, in Lunar Source Book*, eds. G. Heiken, D. Vaniman and B. French, 1991.

16) Vasavada, A. R., Paige, D. A., and Wood, S. E., "Near-surface temperatures on Mercury and the Moon and the stability of polar ice deposits," *Icarus*, Vol. 141, 1999, pp.179~193.

17) Ferziger, J. H., *Numerical Methods for Engineering Application*, John Wiley & Sons, 1981.