

論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 46(4), 324-331(2018)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2018.46.4.324

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

달 착륙선의 착륙 후보지별 열 유입량 분석

박태용*, 채봉건*, 이장준**, 김정훈**, 오현웅***

Heat Flux Analysis of Lunar Lander for Potential Landing Candidate Area

Tae-Yong Park*, Bong-Geon Chae*, Jang-Joon Lee**, Jung-Hoon Kim** and Hyun-Ung Oh***

Department of Aerospace Engineering, Chosun University*,**

Korea Aerospace Research Institute(KARI)**

ABSTRACT

The thermal environment on lunar surface is more severe than that of earth's surface or low earth orbit because of the long daytime and nighttime due to 28 days of rotation cycle of moon. Thus, analyzing heat flux on lunar lander at potential landing sites is important to determine the landing site in its initial design phase. In this study, thermal model of lunar regolith that can simulate lunar surface temperature was constructed for analyzing thermal characteristics according to the potential landing sites of lunar lander. The heat flux analyses were performed various latitudes of equator, mid-latitude, polar regions, lunar mare and highland. In addition, we also investigated the heat flux of lunar lander when it is landed on adjacent area to hill.

초 록

달 탐사를 위한 착륙선이 운용되는 열환경은 태양에 대한 달의 자전주기가 약 28일인 것에 기인하여 낮 시간과 밤 시간이 지구에 비하여 매우 장기간 지속 되는 등 지표나 지구 저궤도 환경에 비해 더욱 극단적이다. 달 착륙선의 초기 설계 단계에서는 착륙지 선정에 위해 각각의 후보 지역에서의 착륙선으로의 열 유입량 분석이 중요하다. 본 논문에서는 달 착륙선의 후보 착륙지에 따른 열적특성을 분석하고자 달의 표면온도를 모사할 수 있는 표토층의 열모델을 구축하였다. 그리고 상기 표토층에 착륙선을 적용하여 착륙지가 달의 적도, 중위도, 극지방에 위치한 경우, 바다 및 고지대에 위치한 조건에서의 열 유입량을 분석하였다. 또한 언덕의 경사진 지형조건이 착륙선의 열 유입량에 미치는 영향성 분석을 수행하였다.

Key Words : Lunar Lander(달 착륙선), Heat Flux(열 유입), Thermal Control(열 제어)

1. 서 론

냉전시대였던 1960년대에 미국과 소련의 우주 개발 경쟁에서 시작된 달 탐사는 과학적, 기술적

임무 및 미래 우주기지 구축, 또는 헬륨-3과 희토류와 같은 자원 발굴의 목적을 갖고 유럽, 중국 및 일본 등의 우주개발 선진국에 의해서 지속되고 있다[1]. 2000년대에 들어서는 일본의 SELENE,

† Received : November 15, 2017 Revised : February 13, 2018 Accepted : March 6, 2018

*** Corresponding author, E-mail : ohu129@chosun.ac.kr

유럽의 SMART-1, 인도의 찬드라얀 1호 등의 달 궤도선이 개발되어 성공적으로 달 탐사 임무를 마쳤다[2-3]. 달 착륙선 임무의 경우 중국의 창어 3호가 2007년 달 표면 착륙에 성공하였으며[4], 일본 또한 SELENE-2 프로그램을 통해 달 착륙선을 개발 중에 있다[5].

달 착륙선의 경우, 약 28일에 이르는 달의 자전 속도로 인해 낮과 밤 구간의 길이가 각각 14일로 지구에 비해 현저하게 느리며, 또한 열을 흡수하는 대기의 부재 및 달 표토층의 높은 열 흡수율 및 방사율로 인해 표면온도가 최대 300°C의 높은 온도차를 나타내는 극한의 열환경에 노출된다[6-7]. 이와 같은 극단적인 열환경에서 탑재 임무장비의 작동 시 소자의 발열에 따른 온도 상승 또는 장비의 비 작동 시 과도한 냉각이 이루어질 경우 정상적인 작동을 기대할 수 없게 된다. 따라서 달 표면의 가혹한 열환경 하에서 착륙선의 모든 임무장비의 생존을 비롯해 안정적인 작동성능 보장을 위해서는 허용온도 범위를 벗어나지 않도록 설계되어야 하며, 이를 위해 초기 설계 단계에서 달 표면의 열환경을 비롯하여 달 착륙선의 열적 특성에 대한 분석이 중요하다.

기존 연구에서는 실제 달 탐사 임무를 통해 전체 달 표면에 대한 표면온도 및 열적 특성에 대한 측정 및 분석이 이루어졌다[8-10]. 대표적으로 미국 NASA의 아폴로 11호, 14호, 15호 및 17호 착륙선들의 임무를 통해 달 표면 및 표면 아래의 온도 측정 데이터를 획득한 바 있다. 또한 이와 함께 각 착륙지점 별 표토층의 흡수율, 방사율과 표토층의 깊이에 따라 달라지는 열전도율 및 밀도 등의 열 물성치를 측정하였다[8]. 이후 NASA에서 개발된 탐사선인 Lunar Reconnaissance Orbiter(LRO)의 Diviner Lunar Radiometer Experiment(DLRE) 탑재체를 이용한 원격 측정을 통해 달의 극지방 및 크레이터(Crater)의 온도 분포를 비롯해 달 위도 및 경도에 따른 달 표면의 전체적인 온도분포가 분석되었다[9]. Hager et al.[10]은 달 열환경 분석이 가능한 틀인 Thermal Moon Simulator(TherMoS)를 이용하여 크레이터 지역의 온도분포를 예측하고 이를 LRO 탐사선의 DLRE 측정데이터와의 비교를 통해 예측결과의 타당성을 입증하였으며, 탐사선 로버 운용 중 바위에 근접할 경우에 대한 열해석을 실시하였다. 이와 같이 달 표면에서의 탐사 임무에 있어서 위도 및 지형조건에 대한 열적 영향성 검토가 필요함을 알 수 있다.

본 논문에서는 달 표면온도 조건을 모사가 가능한 달 표토층의 열모델을 구축하였으며, 열해

석을 통해 예측된 달의 자전에 따른 온도변화를 실제 아폴로 17호 측정 데이터와의 비교함으로써 열모델의 유효성을 검증하였다. 이를 기반으로 표토층 위에 착륙선을 적용하여 착륙선이 달의 적도, 중위도, 극지방의 다양한 위도조건을 비롯해 달의 바다 및 고지대에 위치한 경우, 그리고 언덕 부근에 위치한 조건에서의 각 판넬에 입사되는 열 유입량 분석을 통해 착륙선의 열적특성을 비교분석하였다.

II. 본 론

2.1 달 열환경 및 착륙 후보지 개요

달의 열환경은 태양에너지, 알베도 및 행성으로부터의 복사에너지가 있으며, 각 환경조건 별로 달의 낮/밤 구간에 해당하는 값과 함께 LRO 임무를 통해 측정된 위도 별 최대/최소 표면온도를 Table 1에 각각 나타내었다. 달 표면은 높은 흡수율/방사율을 지니며, 열에너지가 분산되는 대기가 없기 때문에 최대 1,420W/m²의 태양 에너지에 대한 행성 복사량이 낮 구간에서 최대 1,320W/m²이며, 밤 구간에서는 태양광이 없으므로 5.2W/m²의 작은 값을 나타내어 지구 저궤도 환경에 비해 더욱 극단적이며 열악하다. 또한 이러한 환경조건들로 인해 적도에서의 달 표면온도는 낮/밤에 따라 평균 -158°C~122°C로 280°C 이상의 온도차를 나타내는 것을 알 수 있다. 고위도 지역일수록 온도차는 좁혀져 열적조건이 완화될 수도 있으나, 낮/밤 구간의 길이가 1년의 주기로 계속 달라짐에 따라 밤 구간의 장기화가 지속될 경우 임무장비의 최소 허용온도 유지를 위한 열원 공급에 있어서 난점으로 작용하게 된다. 위도 90°의 북극점 근방에서는 낮/밤에 관계없이 상시 태양광을 받는 지역이 일부 나타나는데, 이 지역에서조차 -43°C~-63°C의 표면온도를 나타내고 있기에 착륙선의 생존을 위한 별도의 열원 공급수단이 필수적이게 된다.

또한 달 표면 전역은 표토(Regolith)라고 불리는 고운 가루와 같은 입자로 덮여 있으며, 비교적 생성된 시기가 30~40억 년 전인 것으로 추정되는 달의 바다(Lunar Mare) 지역에서는 표토가 4~5m 깊이이며, 그보다 더 시간이 오래된 고지대(Highland)에서는 10~15m 정도의 표토가 쌓여 있는 것으로 추정된다. 아폴로 임무에서 측정된 달 표면의 알베도는 측정지점에 따라 0.076~0.297의 범위를 나타내고 있으며, 주로 표면이 어두운 바다 지역에 비해 색이 밝은 고지대에서 비

Table 1. Lunar Thermal Environmental Conditions in Daytime and Nighttime[6]

Parameter		Daytime (Hot)	Nighttime (Cold)
Direct Solar(W/m ²)		1,420 (Subsolar Peak)	0 (Dark Side)
Albedo[8]		0.076~0.297	0 (Dark Side)
Planetary IR(W/m ²)		1,320 (Subsolar Peak)	5.2 (Dark Side)
Surface Temperature (°C)[9]	Pole (Lat. 90°)	-43	-63
	Mid-latitude (Lat. 45°)	77	-143
	Equator (Lat. 0°)	122	-158

교적 높은 알베도가 나타나게 된다. 이러한 달 표면의 열환경 조건에 따라 달 착륙선의 구조체 판넬이 흡수하는 열에너지가 상이할 것으로 예상된다.

본 연구에서는 달 착륙선의 상세 열설계에 앞서 상술한 위도 별, 지역 별 열환경 조건을 고려하여 Fig. 1과 같이 총 5군데의 후보 착륙지점을 선정하였으며, 착륙선 판넬별 열 유입량 분석을 실시하였다. 그림에 과거 미국의 아폴로 및 서베이어, 소련의 루나 프로젝트에서 개발된 달 착륙선들의 착륙지점 또한 표시하였다. 과거 실제 착륙선들의 착륙지점이 주로 적도~중위도 사이의 지역에 분포되어 있는 것을 알 수 있으며, 이는 극지방에서 상술한 열환경 조건들로 인해 밤 구간에서의 생존에 어려움이 있기 때문인 것으로 사료된다. 상기 자료를 토대로 선정한 착륙지 Case 1과 2는 각각 위도 0°의 적도에서의 달의

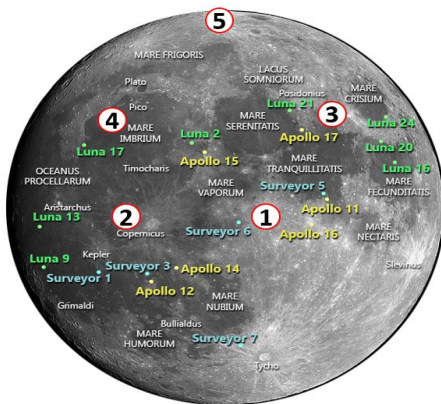


Fig. 1. Potential Landing Candidate Areas on Moon [11]

고지와 바다 지역, 그리고 Case 2와 3은 각각 위도 45°의 중위도에서의 달의 고지와 바다 지역을 정의하였다. 그리고 마지막으로 위도 90°의 극지방을 Case 5로 정의하였다.

2.2 표토층 열모델 구축 및 열해석 개요

Figure 2는 열 유입량 관점에서 달 표면의 열환경이 달 착륙선에 미치는 열적 영향을 검토하고자 구축된 표토층의 열모델을 나타낸다. 총 0.62m 깊이의 표토층은 우주공간에 노출되는 지표면으로부터 0.02m 깊이의 먼지(Fluff)층과 나머지 0.6m 두께의 표토층으로 구성된다. 그리고 달 착륙선의 열 유입량에 영향을 미치지 않도록 100m×100m로 면적을 충분히 크게 하였다. 그리고 컨택터(Contactor)를 이용하여 먼지층과 표토층간의 열전도를 모사하였다.

구축된 Fig. 2의 표토층 열모델의 중앙에 달 착륙선의 열모델을 표면으로부터 0.3m 이격된 높이에 배치하였다. 상기 열모델은 단일 절점을 갖는 총 6개의 1m×1m 면적의 정사각형 알루미늄 구조체 판넬로 이루어진 정육면체로 단순화시켜 구현하였다. 착륙선 외부 표면의 열광학 물성치는 후보 착륙지의 열환경 조건에 따른 열 유입량 계산을 목적으로 흡수율 및 방사율이 각각 1.0인 흑체로 가정하였다. 달 착륙선에 의한 그림자 효과를 효과적으로 모사하기 위해 착륙선이 배치되는 표토층 중앙의 9.9m×9.9m 면적은 절점 간격을 0.3m로 하고, 그 외의 면적은 절점 수를 최소화하기 위해 10m 간격으로 모델링하였다. 해석에 사용된 총 절점 개수는 9,096개이다.

Table 2는 먼지층 및 표토층에 각각 적용된 열물성치를 나타낸다. 실제 표토층은 열전도율, 비열 및 밀도가 깊이와 온도에 대한 의존성이 있으나 [10], 본 연구에서는 달 표면의 최저온도에 있어서 지배적인 영향을 미치는 열전도율의 온도 의존성만을 고려하였다. 따라서 Fig. 2의 열모델 상에 반영하기 위한 먼지층 및 표토층의 열전도율인

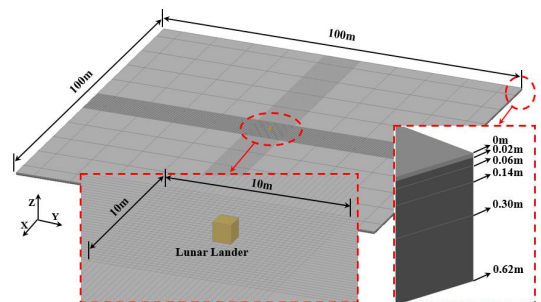


Fig. 2. Thermal Model of Lunar Regolith

Table 2. Thermal Properties Applied for Analysis

Parameter		Highland	Lunar Mare
Thermo-Physical Property	Conductivity (W/m°C)	Eq. 1(Fluff) / Eq. 2(Regolith)	
	Specific Heat (J/kg°C)	1,050	
	Density (kg/m ³)	1,000(Fluff) / 2,000(Regolith)	
Thermo-Optical Property (Fluff) [10]	Absorptivity (a)	0.703	0.924
	Specularity	0.297	0.076
	Emissivity (e)	0.97	

k_{fluff} 와 k_{reg} 은 식 (1)과 (2)로부터 계산하였다.

$$k_{fluff} = 9.22 \times 10^{-4} \{1 + 1.48(T/350)^3\} \quad (1)$$

$$k_{reg} = 9.30 \times 10^{-3} \{1 + 0.73(T/350)^3\} \quad (2)$$

여기서, T 는 온도를 나타낸다.

전도율을 제외한 비열과 밀도는 Table 2와 같이 온도 및 깊이에 따른 의존성과 무관한 고정값으로 부여하였다. 열광학 물성치의 경우, 우주 공간에 노출되어 외부와 복사 열교환이 발생하는 먼지층 표면에만 적용하였으며, 열 유입량 해석 시 고지대와 바다의 상이한 흡수율과 알베도를 고려하였다. 그리고 방사율은 지역에 따른 차이가 비교적 적으며 바다와 고지대 간의 물성치 차이를 알기 어렵기 때문에 두 지역 모두 0.97의 동일한 값으로 고려하였다. 또한 발열조건의 경우, 달 내부의 지각활동에 의한 열 유입량인 $0.031W/m^2$ 를 깊이 0.62m 지점에 적용하였다. 본 연구에서는 후보 착륙지에 따른 열 유입량의 상대비교가 목적이기에 Fig. 2의 표토층 열모델은 Christie et al.[12]의 연구에서 제안된 모델링 방법을 참고하여 구축하였다. 열모델은 Thermal Desktop[13]으로 구축하고 SINDA/FLUINT[14]를 이용하여 열해석을 실시하였다.

구축된 표토층 열모델의 유효성을 검증하고자 열해석을 통해 도출된 달의 자전에 따른 온도 프로파일은 Fig. 3과 같다. 또한 비교를 위해 그림에는 아폴로 17호의 HFE(Heat Flow Experiment)를 통한 달에서의 실측 결과도 함께 나타내었다. 분석 결과로부터 아폴로 17호의 착륙지인 위도 20°에서의 표토층 표면의 온도 경향성은 거의 유사하며, 최저/최고온도는 약 -180.93°C 및 107.2°C로, 실측 결과 대비 각각 약 4.3°C 및 7.54°C의 차이가 나타난다. 이는 실제 아폴로 17호 착륙지에서의 모든 물성치를 정확히 알 수 없기에 발생하는 차이인

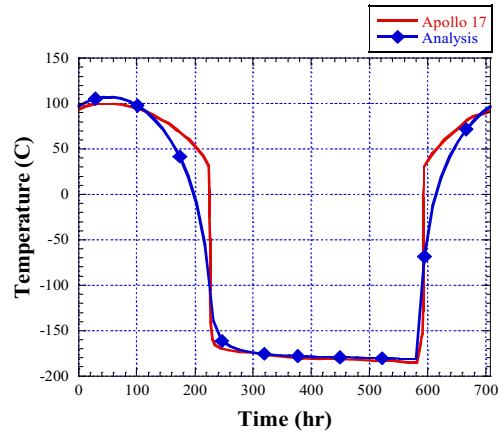
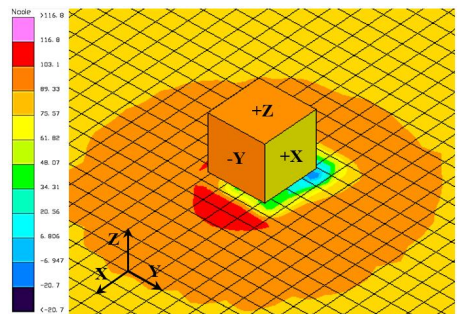


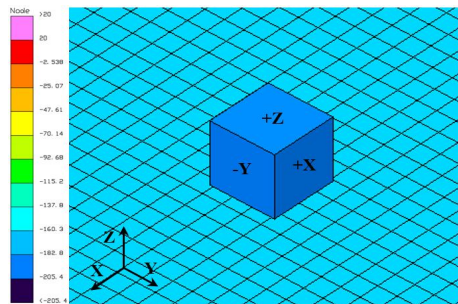
Fig. 3. Comparison of Analyzed Lunar Surface Temperature at 20° Latitude with In-situ Measurement Data of Apollo 17

것으로 판단된다.

Figures 4(a)와 (b)는 각각 낮/밤 구간에서의 달 착륙선 주변의 표토층의 온도 분포를 나타낸다. 우선 낮 구간에서는 Fig. 4(a)와 같이 착륙선과의 거리가 충분히 이격되어 있어 영향을 받지 않은 표면은 약 103.1°C를 나타내고 있는 반면, 태양광이 입사되는 -Y 판별 근방에서는 착륙선과의 복



(a)



(b)

Fig. 4. Temperature Distributions of Regolith at 20° Latitude ((a) Daytime, (b) Nighttime)

사 열교환에 의해 표면온도가 부분적으로 116.8°C 까지 증가함을 알 수 있다. 또한 착륙선에 의해 태양을 바라보지 못하는 표토층의 표면 온도는 약 -20.7°C에 이르러 그림자 효과가 적절히 구현된 것을 알 수 있다. 반면 Fig. 4(b)와 같이 밤 구간에서는 외부 복사 열 유입이 없기에 착륙선의 존재와 무관하게 모든 면적이 약 -182.8°C로 수렴되며, 균등한 표면 온도분포를 나타낸다. 상기의 분석결과들로부터 구축된 열모델이 열적 분석을 수행함에 있어서 충분한 유효성을 갖는 것으로 판단된다.

2.3 달 착륙선 열 유입량 분석

2.3.1 위도 및 지역 별 분석

Figures 5(a)와 (b)는 위도 0°의 적도에서 달의 고지대와 달의 바다 지역에 각각 위치하였을 경우, 낮 구간 동안 각 판넬별로 계산된 단위 면적 당 열 유입량의 변화를 나타낸다. 여기서 시간에 따른 태양 입사각은 일출 시 +X 판넬에서 시작하여 +Z 판넬 그리

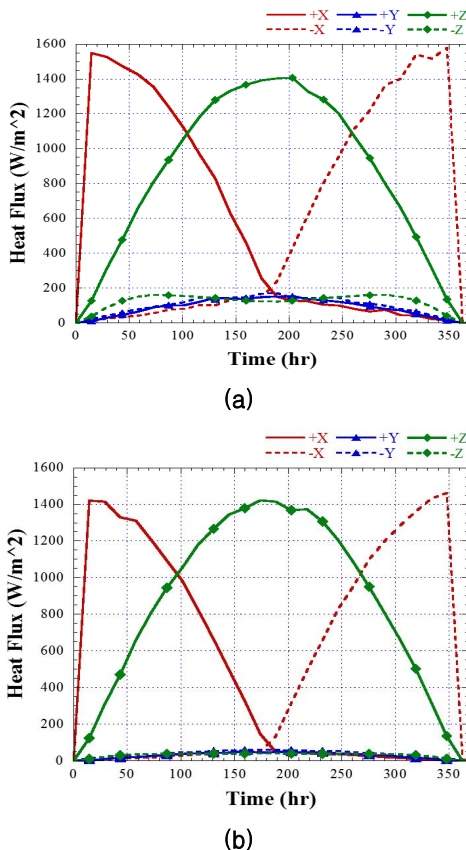


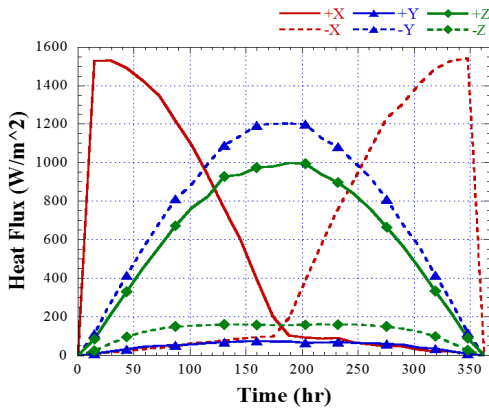
Fig. 5. Heat Flux Analysis Results on Potential Landing Areas at 0° Latitude ((a) Case 1: Highland, (b) Case 2: Lunar Mare)

고 일몰 시 -X 판넬의 순서로 태양광이 입사되는 조건이다. 우선 Fig. 4의 고지대에 대한 분석 결과로부터 상기의 +X, -X 및 +Z 방향의 3개 판넬에서 최소 1,420W/m² 이상의 열 유입량이 입사됨을 알 수 있다. 그리고 나머지 +Y, -Y 및 -Z 판넬은 태양입사각에 대한 배치 각도 상 태양광을 거의 받지 않으나, 표토층의 영향을 받아 최대 약 171.6W/m²의 열 유입량이 발생하였다. 상기의 결과를 Fig. 5 (b)의 바다 지역에 착륙 시의 결과와 비교하면 표토층을 바라보지 않는 +Z 판넬을 제외한 나머지 5개 판넬은 고지대에서 비교적 높은 알베도의 영향으로 인해 열 유입량이 바다지역에 비해 전반적으로 더욱 높음을 알 수 있다. 특히 +X 및 -X 판넬의 경우, 고지대에서의 열 유입량이 바다지역에 비해 약 9.04% 증가한 값이 도출되었다. 상기의 분석결과로부터 착륙 지역의 표토층의 특성에 따라 착륙선에 미치는 열적 영향이 존재함을 알 수 있다.

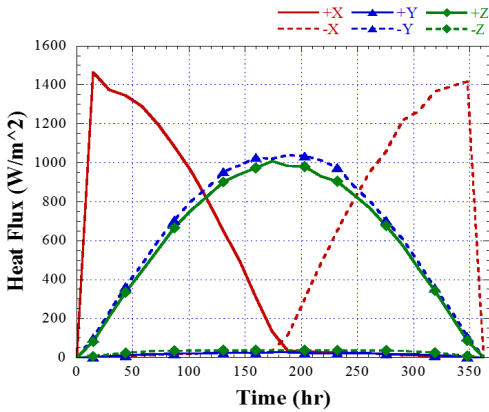
Figures 6(a)와 (b)는 위도 45°의 중위도에서 달의 고지와 바다 지역에 각각 위치하였을 때 낮 구간 동안의 각 판넬별 열 유입량을 나타낸다. 시간에 따른 태양 입사 조건은 상기 적도에 대한 분석결과와 동일하게 하였다. 우선 적도에서와 마찬가지로 알베도의 영향에 의해 고지대에서보다 바다지역에서 판넬 전체의 평균 열 유입량이 전반적으로 더욱 큰 것을 알 수 있다. 고지대에서 +X와 -X 판넬의 경우, 위도가 변경됨에도 태양과 이루는 각도조건은 적도에서와 유사하여 최대 열 유입량이 약 1541.9W/m²로 나타났다. 그리고 -X 판넬의 열 유입량은 적도와 바다지역 간 약 8.8%의 차이를 나타내어 Fig. 5의 결과와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

또한 달 착륙선은 일반적으로 착륙 시 표토층을 바라보는 -Z 방향 판넬에 배치된 추진 로켓의 분사로 인해 표토와 먼지가 일시적으로 공중에 머무르게 된다. 이에 따라 X, Y 방향 측면 판넬들에 방열판을 배치할 경우, 표토 입자가 방열판 표면에 흡착되어 방열면의 흡수율이 상승하여 방열 성능이 감소하는 주된 원인이 되므로, 먼지에 의한 영향이 최소화되는 +Z 판넬에 방열판을 배치하게 된다. 따라서 고지대에서의 Fig. 6(a)의 결과로부터 +Z 판넬은 적도에서의 열 유입량에 비해 약 40.9% 감소한 998.1W/m²를 나타내기 때문에 여기에 방열판 적용 시 적도와 비교하여 비교적 적은 에너지가 방열판에 입사되어 비교적 효과적인 방열이 이루어질 것으로 판단된다.

Figure 7은 극지방에 착륙 시 착륙선의 판넬별 열 유입량을 나타낸다. 달의 적도면과 태양 사이의



(a)



(b)

Fig. 6. Heat Flux Analysis Results on Potential Landing Areas at 45° Latitude ((a) Case 3: Highland, (b) Case 4: Lunar Mare)

경사각이 최대 약 1.5°까지 나타나는 점을 고려하여 90°가 아닌 88.5° 지점에 착륙한 것으로 가정하여 열 유입량을 계산하였다. 그리고 태양광은 달의 자전에 따라 +X→+Y→-X 판넬 순으로 입사되는 조건이다. 분석 결과, 적도나 중위도 지역과 달리 포토층이 태양광을 거의 받지 못함에도

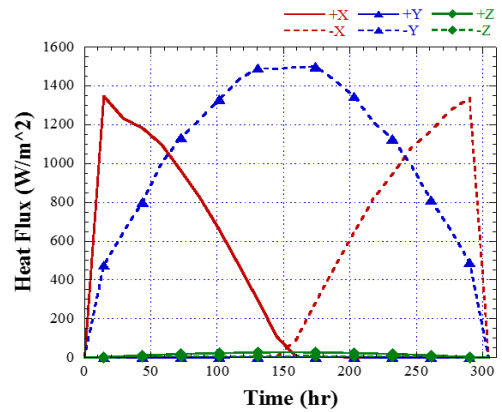


Fig. 7. Heat Flux Analysis Results on Potential Landing Areas at 88.5° Latitude (Case 5)

알베도의 영향으로 인해 -Y 판넬에서 약 1,500.3 W/m²의 열 유입량을 나타내게 된다. 이 때 +Z 판넬의 경우, 모든 시간동안 태양이 아닌 우주공간만을 바라보고 있어 외부로부터의 열 유입량이 거의 없기에 여기에 방열판 적용 시 모든 위도 조건 중에서 가장 효율적으로 방열이 이루어질 것으로 판단된다. 그러나 계절변화에 따른 극지방에서의 불규칙적인 낮 구간으로 인해 다른 착륙지와 비교하여 전력생성을 비롯해 착륙선의 온도 유지 측면에서 불리하며, 이러한 점들로 인해 Fig. 1에서도 과거 해의 착륙선들이 극지방에 착륙한 사례가 없기에 후보 착륙지로서는 열 유입량 뿐만이 아닌 다양한 측면에서의 검토가 필요할 것으로 판단된다.

Table 3은 위도 및 지역에 따른 낮 구간 동안의 판넬별 평균 열 유입량을 나타낸다. 본 연구에서 수행된 열해석의 경우 시간에 따른 열 유입량에 다소 비대칭성이 나타난다. 이러한 이유는 달의 자전주기와 열해석 간의 분석시간 간격에 차이가 발생하기 때문이다. 또한 달의 자전과 함께 태양에 대한 달의 상세한 궤도변화가 해석상에 반영됨에 따른 영향도 있다. 그러나 본 연구에서의 열해

Table 3. Summary of Analyzed Average Heat Flux with Various Potential Landing Candidate Areas

Landing Site	Latitude	Region	Average Heat Flux (W/m ²)						Total
			+X	-X	+Y	-Y	+Z	-Z	
Case 1	0°	Highland	510.3	508.1	84.5	94.3	813.8	115.7	2126.7
Case 2	0°	Lunar Mare	427.3	427.5	28.2	37.0	818.6	30.3	1769.0
Case 3	45°	Highland	507.6	502.6	47.9	722.1	595.5	118.9	2494.6
Case 4	45°	Lunar Mare	436.5	432.9	16.5	630.8	594.7	28.4	2139.8
Case 5	88.5°	Highland	373.1	370.1	1.7	1004.9	16.1	4.7	1770.7

석은 후보 착륙지의 위도 및 지역에 따른 열 유입량이 상대비교를 위해 수행되었다. 따라서 상기의 비대칭성이 달의 위도 및 지역에 따른 열 유입량의 경향성에 변화를 야기할 정도는 아니기에 Table 3의 분석결과를 그대로 제시하였다.

우선, 방열판이 주로 배치되는 +Z 판넬 관점에서 Case 1과 2의 적도 지역이 다른 지역보다 열 유입량이 높아 방열효율이 감소하기에 비교적 약조건에 있음을 알 수 있다. 또한 상기 적도에서의 두 Case는 서로 유사한 수준의 열 유입량이 나타나지만, 평균 열 유입량의 합계가 2126.7 W/m²로 Case 2의 바다지역보다 약 20.2% 높게 나타나는 Case 1의 고지대에서 착륙선에 대해 열적으로 최악조건임을 예상할 수 있다. 이를 통해 착륙선에 미치는 열적 영향이 위도나 지역별로 상이하므로 후보 착륙지 분석에 있어서 고려되어야 하는 인자임을 알 수 있다. 그러나 상기 열환경 조건을 고려한 착륙선의 열설계를 통해 방열면적 및 열원공급량을 조절할 경우 어느 착륙지에서도 충분히 생존이 가능할 것으로 판단된다.

2.3.2 주변 지형조건에 따른 분석

달 착륙선의 착륙지점에 따라 월면의 계곡, 바위 및 언덕과 같은 다양한 지형조건에 의한 열적 영향에 노출될 수 있기 때문에 열해석을 통해 상기 지형에 대한 영향성을 검토하였다. 계곡의 경우, 실제적으로 착륙선에 열적 영향이 발생할 만큼 계곡에 가깝게 착륙하지 않으며, 계곡에 가깝게 착륙한다 하여도 달 착륙선에 미치는 열적 영향은 미소할 것으로 판단된다. 또한 바위는 사이즈에 따라 열 유입량이 상이할 것이기에 본 연구에서는 언덕 지형에 의한 열적 영향만을 검토하였다.

Figure 8은 구축된 언덕 지형의 열모델을 나타낸다. 실제 월면에 존재하는 언덕은 대부분 수십~수백 km의 규모이기에 이를 그대로 열모델로 구축하는 것은 해석시간이 과도해질 수 있다. 따라서 본 연구에서는 언덕 존재에 따른 경향성 검토를 위해 언덕의 일부 경사면만을 모델링 하였다. 경사면의 높이는 약 22m이며, 착륙선이 위치한 평지와 경사면 간의 각도는 45°이다. 그리고 착륙선은 언덕이 시작되는 지점으로부터 약 1.5m 거리에 위치하고 +Y 판넬이 언덕 경사면을 바라보는 것으로 가정하였다.

Figure 9는 상기의 언덕 지형에서의 달 착륙선의 판넬별 열 유입량을 나타낸다. 경사면에 의한 알베도 및 복사 영향으로 모든 판넬에서 전반적으로 열 유입량이 증가하며, 특히 경사면을 바라보는 +Y 판넬은 200.7W/m²를 나타내어 평지에서 84.5W/m²인 것에 비해 약 2.38배 증가하였다.

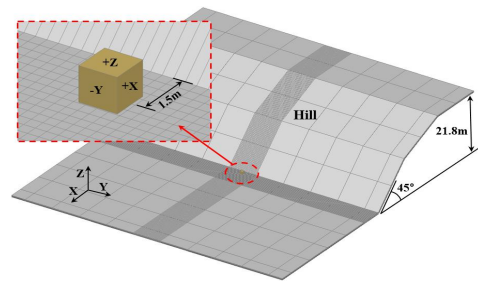


Fig. 8. Thermal Model of Lunar Lander Adjacent to Hill

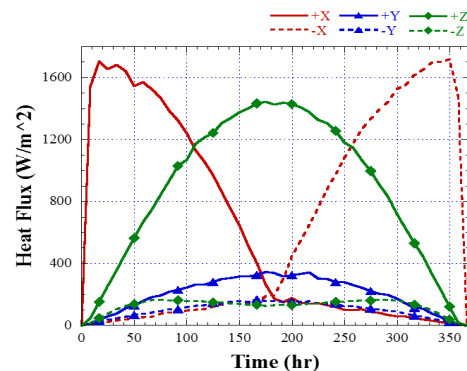


Fig. 9. Heat Flux Analysis Results of Lunar Lander Adjacent to Hill

따라서 착륙선 설계 시 탑재 임무장비 및 방열면 배치에 따라서 언덕 등의 지형조건에 의한 장비 온도상승이 우려된다. 그러나 후보 착륙지 선정 후에 주변 지형에 기반한 최악조건 분석과 함께 방열판 사이즈를 조절하는 등 적절한 열설계를 통해 충분히 극복 가능한 범위 내에 있는 것으로 판단된다.

III. 결 론

본 연구에서는 극한의 열환경에 노출되는 달 착륙선의 열적 특성을 분석하고자 달 표토층의 열모델을 구축하고 아폴로 17호의 온도 실측결과와의 비교를 통해 그 유효성을 입증하였다. 이를 토대로 표토층 위에 달 착륙선을 배치하고 수행한 착륙 후보지의 위도 및 지역에 따른 열 유입량 분석 결과로부터 방열판이 주로 배치되는 +Z 판넬에 대한 열 유입량이 비교적 적은 중위도의 고지대 지역이 방열 효율 측면에서 가장 호조건임을 알 수 있었다. 또한 상기 지역을 기준으로 착륙선 주변에 언덕 지형이 존재할 경우에 대한 분석을 통해 착륙선의 일부 판넬의 열 유입량이 증가하는 영향성이 있음을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부, 달탐사개발사업의 지원으로 수행됨.(No. 2017M1A3A9043303)

References

- 1) Schmitt, H., "Return to the Moon: Exploration, Enterprise and Energy in the Human Settlement of Space", *Springer Science & Business Media*, New York, 2007.
- 2) Jin, S., Arivazhagan, S., and Araki, H., "New Results and Questions of Lunar Exploration from SELENE, Chang'E-1, Chandrayaan-1 and LRO/LCROSS", *Advances in Space Research*, Vol. 52, 2013, pp. 285~305.
- 3) Burchell, M. J., Robin-Williams, R., and Foing, B. H., "The SMART-1 Lunar Impact", *Icarus*, Vol. 207, No. 1, 2010, pp. 28~38.
- 4) ZeZhou, S., Yang, J., and He, Z., "Technological Advancements and Promotion Roles of Chang'e-3 Lunar Probe Mission", *Science China Technological Sciences*, Vol. 56, 2013, pp. 2702~2708.
- 5) Tanaka, S., Mitani, T., Otake, H., Ogawa, K., Kobayashi, N., Hashimoto, T., Hoshino, T., Otsuki, M., Wakabayashi, S., Kimura, J., and Kuramoto, K., "Present Status of the Lunar Lander Project SELENE-2", *44th Lunar and Planetary Science Conference*, Vol. 44, 2013, pp. 1838.
- 6) Heiken, G., Vaniman, D., and French, B. M., "Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon", *CUP Archive*, Texas, 1991.
- 7) Zuliani, H., Oikawa, T., and Yoshida, K., "Thermal based Path Planning using Solar Orientation for a Lunar Micro Rover", *31th International Symposium on Space Technology and Science*, 2017-i-10, June 2017, pp. 1~6.
- 8) Grott, M., Knollenberg, J., and Krause, C., "Apollo Lunar Heat Flow Experiment Revisited: A Critical Reassessment of the In Situ Thermal Conductivity Determination", *Journal of Geophysical Research: Planets*, Vol. 115, 2010, pp. 1~11.
- 9) Vasavada, A. R., Bandfield, J. L., Greenhagen, B. T., Hayne, P. O., Siegler, M. A., Williams J. P., and Paige, D. A., "Lunar Equatorial Surface Temperatures and Regolith Properties from the Diviner Lunar Radiometer Experiment", *Journal of Geophysical Research*, Vol. 112, 2012, pp. 1~12.
- 10) Hager, P. B., "Dynamic Thermal Modeling for Moving Objects on the Moon", Dissertation, *Technische Universität München*, München, 2013, pp. 1~206.
- 11) <https://www.bobthealien.co.uk/moon/landing sites.htm>
- 12) Christie, R. J., Plachta, D. W. and Hasan, M. M., "Transient Thermal Model and Analysis of the Lunar Surface and Regolith for Cryogenic Fluid Storage", *NASA*, 2007, pp. 1~19.
- 13) Thermal Desktop User's Manual, Ver 5.8, *C&R Technologies, Inc.*, Colorado, 2017.
- 14) SINDA/FLUINT User's Manual, Ver 5.8, *C&R Technologies, Inc.*, Colorado, 2015.