

논문 2014-51-10-8

달 탐사를 위한 달 표면에서의 무선통신 환경 분석

(Analysis on Wireless Communications Environment at Lunar Surface for Lunar Exploration)

이 용 민*, 이 병 선*, 안 재 영*

(Yong-Min Lee[Ⓒ], Byong-Sun Lee, and Jae-Young Ahn)

요 약

본 논문에서는 달 표면에서의 무선통신에 영향을 미칠 수 있는 달의 내, 외부 요인으로서 온도, 우주방사선, 먼지입자 등에 의한 무선통신 환경 및 통신 임무장비에 대한 영향을 분석하였으며, 또 다른 영향 요인으로서 유성충돌, 달에서의 지진활동, 달의 지자기 분포 등에 대해서도 고찰하였다. 본 논문에서 제시된 결과는 향후 국내 달 탐사 프로젝트에서 달에서의 무선통신 시스템 설계에 효과적으로 활용할 수 있는 기초적인 자료로 활용될 것이다.

Abstract

Evaluation of the possible or probable effects of environmental conditions which are temperature, radiation, dust as well as other possibilities in terms of meteoroids, seismicity, and no global magnetic field has been carried out for wireless communications on the lunar surface in this paper. The results considered in this paper can be utilized as a basic information on making efficient use of the design for wireless communications system in Korean lunar exploration project.

Keywords : Wireless, Communications, Lunar, Environment, Exploration

I. 서 론

유인 또는 무인의 달탐사를 위해서는 궤도선(orbiter), 착륙선(lander), 로버(rover) 등의 탐사요소들에 대한 원격제어는 물론 그들을 통해 확보된 영상 및 다양한 임무데이터의 지구국 전송을 위해 달 궤도 내에 위치한 각 탐사요소들 간에 높은 신뢰도의 통신링크가 필요하다. 달의 표면 및 달 궤도 내에서의 통신링크는 대부분 무선통신에 의해 연결되며 전파환경 및 지형조건, 전송거리 등에 따라 VHF 대역의 낮은 주파수부터

밀리미터파의 높은 주파수가 사용되며, 때로 달과 지구 사이에 레이저를 이용한 광전송이 이루어지기도 한다.

본 논문에서는 달 표면에서의 무선통신에 영향을 미칠 수 있는 주요 요인으로서 온도, 우주방사선, 먼지입자 등에 의한 영향을 분석하였으며, 그 외의 영향요소로서 유성충돌, 달에서의 지진활동, 달의 지자기 분포 등에 대해서도 고찰하였다.

II. 달 표면의 물리적 환경

지구에서 달까지의 평균거리는 38만 4,400km로 지구에서 태양까지 거리의 400분의 1이다. 지구에서 보는 달의 크기는 약 0.5°로 거의 태양과 같으나, 거리가 다르기 때문에 실제 달의 크기는 지구의 약 4분의 1(반지름, 1,740km), 질량은 지구의 약 81분의 1로, 다른 행성의 위

* 정회원, 한국전자통신연구원 위성무선융합연구부
(Electronics and Telecommunications Research Institute, Satellite & Wireless Convergence Dept.)

Ⓒ Corresponding Author(E-mail: ymlee01@etri.re.kr)

접수일자: 2014년08월22일, 수정일자: 2014년09월10일
게재확정: 2014년09월30일

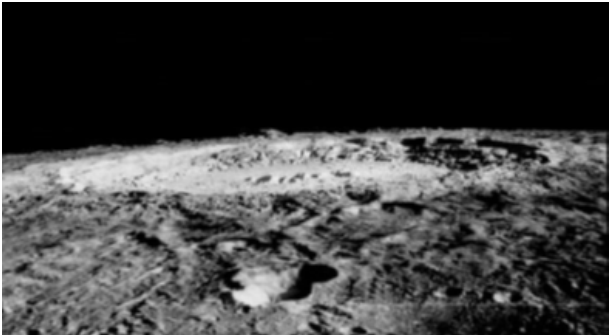


그림 1. 복합적인 형태의 분화구
(코페르니쿠스 크레이터)
Fig. 1. Complex crater named Copernicus Crater.

성에 비해서 그 비율이 월등하게 큰 편이다.

달은 검은색과 회색을 띤 현무암 및 용암대지인 바다와 밝은 색조를 띠며 주로 칼슘과 알루미늄이 많이 함유된 사장석으로 구성된 육지로 구분된다. 육지에는 유성의 충돌로 생겨난 분화구들이 뿔뿔하게 모여 있으며, 분화구의 크기는 $10^{-8} \sim 10^{-3}$ m의 매우 작은 것부터 $10^2 \sim 10^6$ m의 대형 분화구까지 다양하게 분포되어 있다^[1].

따라서, 달의 전체적인 지형은 이러한 수많은 크고 작은 분화구들로 인해 그림 2와 같이 기준점으로부터 아래로 약 9,000m 깊이에서 약 8,000m의 높이까지 매우 심한 굴곡을 이루고 있어 가시거리(LOS : Line of Sight) 확보가 쉽지 않은 특징을 가지고 있다.

또한, 달 표면은 현무암과 사력암으로 구성된 크고 작은 바위들과 운석 등에 의해 잘게 부서진 전토층(regolith)이 달 표면 거의 전체를 덮고 있다. 전토층의 두께는 수십cm에서 수십m에 달하며 주로 고원지대에 두껍게 쌓여 있다. 전토층을 구성하는 입자는 매우 미세하여 우주복이나 정밀기기 등에 침투하기 쉬우며, 절

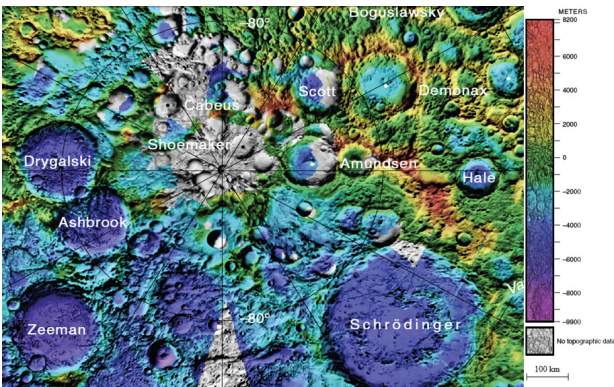


그림 2. 달의 지형 고도 분포
Fig. 2. Hypsography of the moon.

반이 산소로 구성되어 있어 달에서의 산소 공급원이나 건축 재료로 사용이 검토되기도 한다^[2]. 또한 이 입자들은 매우 곱고 전기적으로 대전된 분자구조로 이루어져 있어 통신장에 및 장비의 전기적 손상을 야기 시킬 가능성이 있다.

달에서의 전파 통신 관점에서의 일반적인 특징은 매우 희박한 대기와 구름, 강우, 안개 등과 같은 기상 환경이 형성되지 않아 지구에서 나타나는 전파의 대기 흡수나 전파교란 등의 현상이 발생하지 않으며, 경로손실도 거의 없어 통신 링크의 가용도 계산이 필요가 없다. 그 외에도 지구에서 발생하는 신틸레이션(scintillation)이나 윈더(wander)와 같은 통신장애도 발생하지 않는 특징을 가지고 있다.

이와 같이 달에서의 통신환경이 대체로 지구에 비해 양호한 것으로 판단되나, 이러한 특징 외에 달 표면에서의 온도, 우주방사선, 먼지입자 등과 유성에 의한 물리적 충돌, 달의 지진 현상에 의한 장애, 그리고 달 전체에서의 지자계가 형성되지 않는 점 등은 성공적인 달 탐사를 위해 사전에 반드시 고려해야 할 필요가 있다.

Ⅲ. 달 표면에서의 무선통신 영향 요소분석

1. 온도

지구상에서 하루의 온도 차이가 가장 심한 곳은 사막 지역으로 대개 그 차가 약 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 정도이다. 반면에 달에서의 온도 차이는 태양 빛이 닿을 때와 그렇지 않을 때 달 표면에서 무려 200°C 이상의 차이가 난다. 또한 지구의 그림자가 달 표면을 덮는 월식 때에는 불과 1시간 동안에 표면온도가 영상 70°C 에서 영하 80°C 로 급격한 변화를 나타낸다. 이와 같은 달 표면에서의 온도 변화는 대기가 없는 이유도 있지만 그보다도 달의 표면이 열전달이 잘 되지 않는 물질들로 구성되어 있기 때문이다.

표 1에서 달에서 가장 큰 온도변화를 보이는 경우는 달의 적도지역으로 그 중에서도 달의 표면에 먼지가 쌓여있지 않은 경우이다^[3]. 이때의 온도변화는 $-158 \sim +122^\circ\text{C}$ 로 다음 식의 시스템 총 잡음 온도를 결정짓는 온도 값 중에서 장비의 잡음온도를 일정하다고 가정했을 때, 안테나의 잡음온도 T_A 에 영향을 미치게 된다.

$$T_{SYS} = T_A + T_E \quad (1)$$

이때, 안테나 잡음온도 T_A 는 식(2)와 같이 $R(\theta, \phi)$ 로 표현되는 안테나의 방사 패턴과 안테나의 주변온도 $T(\theta, \phi)$ 의 적분 식으로 표현된다^[4].

$$T_A = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^\pi R(\theta, \phi) T(\theta, \phi) \sin\theta d\theta d\phi \quad (2)$$

즉, 안테나 잡음온도 T_A 는 안테나를 둘러싸고 있는 주변 온도에 대해 안테나의 방사 패턴이 가중치로 작용하여 T_A 를 결정하게 되는 것이다. 그러므로 등방성 안테나의 경우에는 안테나를 둘러싸고 있는 주위의 평균 온도에 의해 안테나 잡음온도가 결정되고, 펜슬 빔(pencil beam)과 같이 매우 높은 지향성을 갖는 안테나의 잡음온도는 빔이 조사되는 안테나 빔 패턴 구간의 온도에만 영향을 받게 된다.

결국 무지향의 등방성 안테나를 사용하는 로버의 경우에는 로버에 탑재된 안테나의 주변 온도에 영향을

표 1. 달 표면위치별 온도변화 분포

Table 1. Temperature change according to the lunar surface position.

구분	달 극 크레이터 (영구 음지)		그 외 극 지역	
	평균 온도	온도범위	평균 온도	온도범위
표면면지두께	온도변화	온도범위	온도변화	온도범위
0.0 m	0	-233	±10	-63~-43
0.5 m	0	-233	±3.9	-56.9~-51.8
1.0 m	0	-233	±1.2	-54.2~-51.8
1.5 m	0	-233	±0.5	-53.5~-52.5
2.0 m	0	-233	±0.3	-53.3~-52.7
2.5 m	0	-233	±0.2	-53.2~-52.8
구분	달 적도 지역		중고도 지역	
	평균 온도	온도범위	평균 온도	온도범위
표면면지두께	온도변화	온도범위	온도변화	온도범위
0.0 m	±140	-158~122	±50	-85.5~14.5
0.5 m	±55.8	-73.8~37.8	±19.6	-55.1~-15.9
1.0 m	±16.6	-34.6~-1.4	±5.8	-41.3~-29.7
1.5 m	±7.5	-25.5~-10.5	±2.7	-38.2~-32.8
2.0 m	±4.3	-22.3~-13.7	±1.5	-37.0~-34.0
2.5 m	±2.8	-20.8~-15.2	±1.0	-36.5~-34.5

받게 되고, 지향성 안테나를 사용하는 착륙선의 경우에는 안테나의 방사패턴에 해당하는 구간의 온도에만 영향을 받게 되는 것이다.

2. 우주방사선

우주방사선은 태양 등의 행성으로부터의 고에너지 미립자와 감마선, 그리고 이들이 대기의 분자와 충돌하여 2차적으로 발생하는 모든 고에너지 미립자 및 감마선을 일컫는다. 달 표면에서의 우주방사선을 발생시키는 원천은 크게 은하 우주선(GCR : Galactic Cosmic Ray)과 태양 고에너지 입자(SEP : Solar Energetic Particle)이다. 단위 면적당 태양 에너지의 양(태양 상수)을 $1,358W/m^2$ 라고 했을 때, 달 표면에서의 우주방사선 발생 원인별 우주방사선 양을 표 2에 나타내었다.

태양으로부터 방출된 고속의 이온들은 그림 3과 같이 달 탐사용 통신장비 내부의 반도체 소자를 통과하여 지나면서, 소자 내에 전류를 흐르게 하는 수많은 전자와 정공 쌍(electron-hole pair)을 만들게 된다. 실제로 외부로부터 대전된 이온이 고속으로 충돌 시에 반도체에 축적된 때 3.6 eV(electron volt)의 에너지마다 하나의 전자와 정공 쌍이 만들어진다. 일반적으로 반도체 소자는 전자와 정공의 적절한 통제에 의해 소자 내에 흐르는 전류를 조절함으로써 원하는 기능을 수행하나,

표 2. 달의 우주방사선 발생 원인별 우주방사선 양

Table 2. Cosmic radiation on the lunar surface.

구분	핵에너지	에너지플럭스
태양풍	0.3 ~ 3 keV	$3 \times 10^8 /cm^2/s$
태양 우주선	<0.1 ~ 1 MeV	$0-10^6 /cm^2/s$
은하 우주선	0.1 ~ >10 GeV	$\sim 2-4 /cm^2/s$

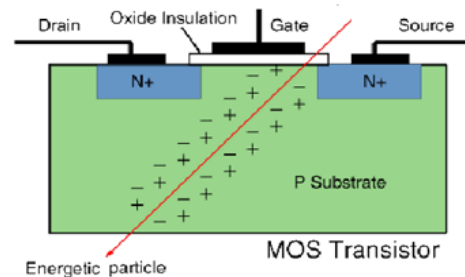


그림 3. 외부 이온 투과에 의한 반도체 소자 내 전자-정공 쌍 생성

Fig. 3. Electron-hole pair generation in semiconductor due to injection of ion from the Sun.

이처럼 외부의 고에너지에 의한 원치 않는 전류의 흐름은 반도체 소자의 오동작을 일으키는 원인으로 작용하게 된다.

예를 들어 기억장치와 같은 민감한 부분에 많은 수의 전자-정공 쌍이 만들어지면 달착륙선이나 로버의 탑재 컴퓨터에 저장된 정보가 바뀌는 단일 사건 업셋(SEU : Single Event Upset)과 같은 단일 사건 효과(SEE : Single Event Effect)가 발생하여 허위 정보를 가지고 달 탐사 임무를 수행할 수 있다^[5]. 더욱이 탑재 모듈의 재시작(restart)과 같은 복구기능이 없거나 우주방사선에 의해 부품의 회로가 타버리는 현상(burnout)이 발생할 경우 달 탐사 임무상의 치명적인 문제를 야기하게 되는 것이다.

달 궤도 또는 달 표면의 무선통신시스템에 영향을 미치는 또 다른 우주방사선은 주로 태양의 흑점 활동에 의한 1차 태양 우주선(SCR : Solar Cosmic Radiation)으로 최대 에너지는 약 10^9 eV 정도이다. 이와 같은 태양 우주선에 의해 임무장비 소자에 누적된 방사선량은 CMOS 회로의 threshold 전압 값을 변경하고, 바이폴라 소자에 대해서는 누설전류를 증가시키거나 이득의 손실을 초래하여 부품의 오동작 또는 통신 성능저하를 유발하고 심한 경우 통신시스템 부품의 심각한 손상을 발생시킨다.

또한, 우주로부터 달 표면에 도달한 고에너지 전자들은 달궤도선이나 달착륙선 또는 로버 내부의 여러 유전체 표면에 대전되게 되는데, 이 때 대전된 유전체의 전하들은 도체에서 방출될 수 있는 전하보다 빨리 도체의 손상전위를 초과하는 전위를 발생하게 되어 결국 방전 현상을 일으켜 유전체 주변의 전자회로나 반도체 등의 전자기기에 치명적인 손상을 유발하게 된다.

3. 먼지입자

지구와 달리 달에는 대기가 없어 수십억 년 동안 수많은 미세운석이 엄청난 속도로 달과 직접 충돌하면서 그로인해 미세한 먼지입자가 달 표면을 뒤덮었을 것으로 예상하고 있다. 이러한 달 표면에 매우 넓게 분포되어 있는 먼지입자의 약 50%는 그 크기가 $20\sim 100\mu\text{m}$ 로, 매우 고우면서도 날카로운 원자구조를 가지고 있어, 달 탐사를 위한 임무장비와 통신설비의 직접적인 고장이나 이상의 원인으로 작용할 수 있다.

이들 미세 먼지입자들은 달에서의 일출, 일몰 시 먼



그림 3. 달 표면의 미세 먼지입자
Fig. 3. Fine dust particles on the lunar surface.

지입자가 광전 변화를 일으키며 스스로 공중으로 부유하여 양지에서 음지로 이동하는 현상을 나타내고 있는데, 이 과정에서 착륙선이나 로버 등의 탐사장비에 필요한 전력 공급 수단인 태양전지판에 쉽게 들러붙을 수 있다. 이로 인해 태양전지판에 들어오는 빛을 막아 태양전지에서 생산하는 전압을 떨어뜨리게 된다.

실제로 달 표면의 먼지입자에 의한 달 탐사 임무수행의 문제발생 가능성이, 앞서 언급한 우주방사선에 의한 문제보다 더 클 것이라고 예측하고 있는데, 그 이유는 태양전지 등은 점차 우주방사선의 피해에 더 잘 견디도록 개발되는 반면에 먼지입자에 잘 저항할 수 있는 어떠한 대안도 존재하지 않기 때문이다^[6].

4. 기타 요소

달에는 대기가 없기 때문에 유성이 달에 충돌할 경우 그 속도가 약 $13\sim 18\text{km/s}$ 에 달하며, 이와 같은 크고 작은 유성들이 달 표면에 착륙한 착륙선이나 로버 등과 직접 충돌할 경우 착륙선이나 로버는 물론 탑재된 통신 시스템에도 치명적인 손상을 유발시키게 된다. 하지만 실제 유성과 착륙선 또는 로버가 충돌할 가능성은 확률적으로 매우 낮아 우려할 수준은 아닌 것으로 판단된다.

또 다른 영향요소는 달에서의 지진활동이다. 그러나 지구의 지진파 에너지 $E_e = 5 \times 10^{24}$ ergs 인 것에 비해 달의 지진파 에너지 $E_m = 10^{11}\sim 10^{15}$ ergs 으로 지구에 비해 훨씬 적은 값을 나타내어 역시 무시할 정도의 수준이다.

달의 외부 자계는 지구와 비교해서 매우 약하게 분포한다. 이는 지구와 달리 두 개의 극에 의한 자계가 현재

까지는 달에 형성되어 있지 않기 때문이며, 지구에서처럼 지자기의 변화로 전리층의 물성 변화 등이 일어나 통신 장애가 발생하는 등의 문제는 고려하지 않아도 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 달 탐사를 위한 무선통신 링크에 영향을 미칠 수 있는 요소로서 달 표면에서의 온도, 우주방사선, 먼지입자, 그리고 유성충돌 및 달의 지진과 에너지와 달의 자계분포 등을 고찰하였다. 무선통신에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었던 달 표면에서의 온도 변화는 등방성 안테나를 사용하는 로버-착륙선간 무선통신구간에서 어느 정도 시스템 잡음온도가 상승할 것으로 판단되나, 두 지점간 거리가 비교적 짧아 통신시스템 설계 시 달 표면의 온도변화를 고려한다면 충분히 극복할 수 있는 문제라고 판단된다. 그 외의 영향요소로 달 표면의 미세 먼지입자에 의한 태양전지판의 전력공급 효율 저하를 제외하고는 직접적으로 무선통신에 영향을 주는 정도는 그렇게 심각하지 않은 것으로 분석되었다.

REFERENCES

- [1] http://www.lpi.usra.edu/publications/books/lunar_sourcebook/pdf/Chapter03.pdf
- [2] KASI, <http://astro.kasi.re.kr>
- [3] <http://sci.esa.int/Conferences/ILC2005/Presentations/JablonskiA-01-PPT.pdf>
- [4] <http://www.antenna-theory.com/basics/temperature.php>
- [5] Edward Petersen, *Single Event Effects in Aerospace*, Wiley, IEEE Press, 2011
- [6] Monique Hollick, Brian J. O'Brien, "Lunar Weather Measurements at Three Apollo Sites 1968-1976", *Space Weather*, 2013

저 자 소 개



이 용 민(정회원)
1991년 광운대학교 전자공학과
학사 졸업.
1995년 광운대학교 전자공학과
석사 졸업.
1999년 광운대학교 전자공학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 위성통신, 마이크로파통신, 레이더
기술>



안 재 영(정회원)
1983년 연세대학교 전기공학과
학사 졸업.
1985년 연세대학교 전기공학과
석사 졸업.
1989년 연세대학교 전기공학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 위성통신, 이동통신, 레이더기술>



이 병 선(정회원)
1986년 연세대학교 천문기상학과
학사 졸업.
1988년 연세대학교 천문기상학과
석사 졸업.
2001년 연세대학교 천문우주학과
박사 졸업.

<주관심분야 : 위성관제시스템, 인공위성 궤도역
학>