

화성 먼지 폭풍의 공간적 분포와 발생시기 분석 연구

서행자*, 김어진**, 김주현***, 이주희****

Analyzing Season and Place of Mars Dust Storm

Haingja Seo*, Eojin Kim**, Joo Hyeon Kim***, Joo Hee Lee****

Abstract

Local dust storm and lifting to dust frequently occurs in Mars. But it is known to lift dust is associated with atmospheric circulation, the cause of dust lifting is not find yet. The height of dust storm is more than the Himalayas, and the large size dust storm covers half of hemisphere or hemisphere. The kind of dust storm is risk factor to land and to carry out a mission.

In this paper, we carry out analysis on the season and place of dust storm, and construct a map with the place of dust storm. We expect that the season and place of dust storm are able to be predicted with being based on the results. And this paper can be utilized as preliminary for selection of landing site and time of launching and landing.

초 록

화성은 국지적인 강한 바람과 그 바람에 의해 표면의 먼지들이 솟아오르는 현상들을 가지고 있다. 대기 순환과 먼지 상승은 서로 관계가 있다고는 알려져 있지만, 먼지 상승의 역학적 원인은 명확하게 밝혀진 것은 없다. 먼지 폭풍은 히말라야 산 높이까지 상승하는 매우 강한 상승 기류인데 이런 기류들은 탐사선이 착륙할 때 또는 로버가 탐사를 수행할 때 피해야 할 위험 요소이다.

본 연구에서는 대기 순환과 관련된 먼지 폭풍의 발생 시기와 발생 지역 분포에 대해 조사하였다. 대기 순환의 원천적인 에너지는 태양이기 때문에 먼지 폭풍의 발생 시기와 화성의 계절에 대해 분석하였고, 최종적으로는 발생 시기와 발생 지역의 공간 분포의 관계를 지도로 작성하였다. 이 자료를 토대로 화성 먼지 폭풍의 발생이 빈번하지 않은 지역과 시기를 예측할 수 있다. 향후 이 자료는 국내 자력으로 화성 착륙선을 보낼 때 착륙시기와 관계하여 발사시점 및 착륙지점을 선정하는데 있어서 결정적인 역할을 할 것이라고 기대한다.

키워드 : 화성 (Mars), 먼지 폭풍 (dust storm), (영문은 소문자, 단 고유명사는 제외)

접수일(2013년 8월 30일),

수정일(1차 2013년 10월 17일),

게재 확정일(2013년 11월 1일)

* 항공우주융합기술연구소/hseo@kari.re.kr

** 항공우주융합기술연구소/jinastro@kari.re.kr

*** 항공우주융합기술연구소/kl0630@kari.re.kr

**** 항공우주융합기술연구소/jhl@kari.re.kr

1. 서 론

화성의 먼지 폭풍은 주로 남반구의 여름에 발생하는 거대한 현상이다. 발생한 먼지 폭풍은 수직 규모가 히말라야 산 높이에 버금가는 높이이며 짧게는 몇 일, 길게는 몇 달 동안 지속되기도 한다. 화성의 대기 대순환과 밀접한 관계가 있는 먼지 폭풍은 규모에 따라 명칭이 다르며 적용되는 모델도 다르다 (그림 1). 먼지 폭풍 중에서도 매우 좁은 영역에서 국지적으로 발생하는 현상을 "dust devil"이라고 하는데 지름이 1~50m의 작은 규모이다. 와류의 중심은 기압이 낮고 따뜻하며, 주로 뜨겁게 데워진 사막지역에 발생하여 약 5m/s로 천천히 움직이고 있다.(Renno et al. 1998).

먼지 폭풍은 과학적인 측면에서는 화성 대기의 운동 및 환경 연구에 중요한 자료가 되지만, 착륙선 및 로버에 의한 탐사를 수행하고자 계획을 세웠을 때는 반드시 고려되어야 할 위험 요소이기도 하다. 또한 먼지 폭풍은 그 하단부에 매우 빠른 속도의 먼지 입자들을 동반하게 되는데 그 입자들은 전기적인 성질을 띠고 있어, 정박하고 있는 착륙선이나 탐사중인 로버에 전자기적인

간섭을 준다고 나사의 Farrell 박사가 밝힌바 있다 (2005 NASA News). 이에 본 연구는 화성 먼지 폭풍의 발생 장소 및 시기, 규모와 지속 시간 등을 분석하여 향후 화성의 착륙지 및 착륙시기를 결정할 때 기본 자료로 활용할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

1.1 화성의 온도 분포 및 대기 순환

화성의 먼지 폭풍은 화성 대기 순환과 관련이 있다고 알려져 있고, 대기의 순환은 대기의 온도 차이에 의해 발생하기 때문에 천구상에서 태양과 화성의 위치 및 화성의 운동을 파악하는 것도 중요하다 (그림 2). 화성은 668.6 sols(화성의 하루)의 공전주기와 1.026일의 자전 주기를 가지고 있으며, 자전축은 25.2도 정도 기울어져 있다. 화성의 한 달은 춘분점에서부터 30도 간격으로 나누어서 설정하였고, 태양 경도 (Solar Longitude)라고 하여 "Ls"라고 명명하였다. 공전 궤도 이심률이 지구보다 크기 때문에 남반구와 북반구의 계절에 따른 온도 차이가 지구보다 크며, 남반구의 여름은 짧고 뜨거운 반면, 북반구의 여름은 길고 차갑다 (Bagenal 2005).

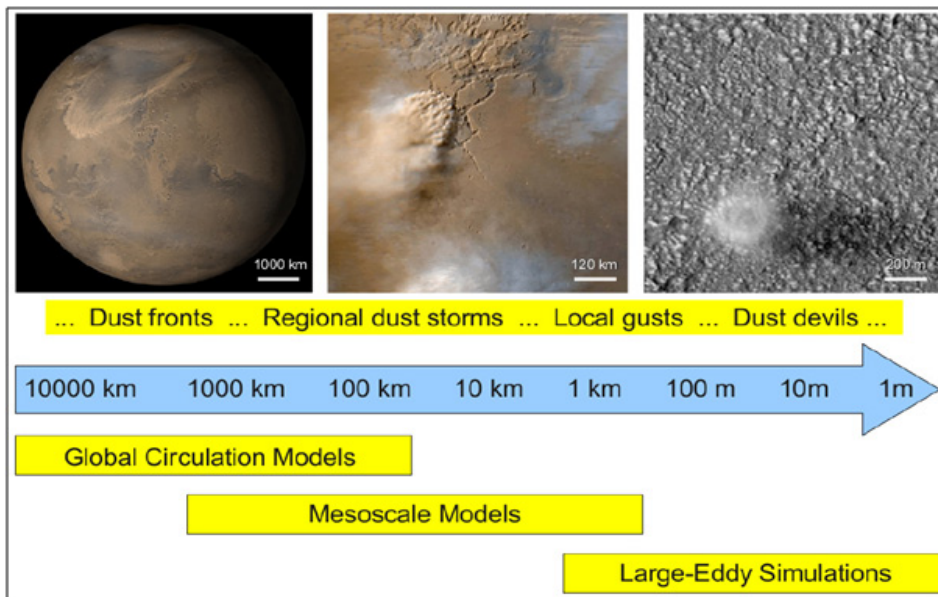


그림 1. 화성 먼지 폭풍의 규모와 적용되는 모델 (Spiga and Lewis 2010)

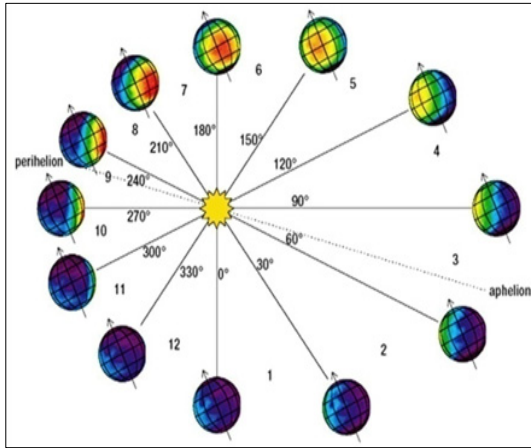


그림 2. 화성의 계절은 춘분점을 기준으로(Ls=0°) 30도 간격으로 한 달을 결정한다(**).

그림 3의 왼쪽 그림은 화성 대기의 수직 온도 분포를 나타낸 것인데 지구만큼 뚜렷한 층을 보이지는 않는다. 또한 지구의 연평균 기온차가 5도에서 15도 사이인 반면, 화성은 여름과 겨울의 기온차가 약 40도에 다다른 것을 볼 수 있다

(그림 3의 오른쪽 그림). 그림 3의 왼쪽 그림에서 주황색으로 표시된 고도 (대략 15km, 1mbar)에서 먼지 폭풍이 발생한다고 알려져 있다 (Heavens et al. 2011).

온도 차이에 의해 발생하는 화성 대기 대순환의 기본 특징들을 살펴보면 다음과 같다; a) 해들리 셀을 포함한 세 개의 셀로 구성된 지구와는 다르게 화성은 단일 셀로 이루어져 있다. 또한 b) 등밀선과 등압선이 일치하지 않아서 발생하는 경압풍(baroclinic eddies)은 겨울일 때만 주기적인 운동을 하고 있고, 반면에 c) 정체전선과 비슷한 정체 경계는 (stationary eddies)은 겨울일 때는 지형의 영향을 받고 있다. d) 이산화탄소 응결의 계절적 변화에 따라 운동을 하는 응축 흐름은 단일한 경로를 갖게 되며 e) 열 조석 효과는, 자전축의 기울기가 지구보다 크고 궤도 이심률도 지구보다 크기 때문에 지구에 비해 매우 강하게 작용한다 (Beatty and Chaikin 1990).

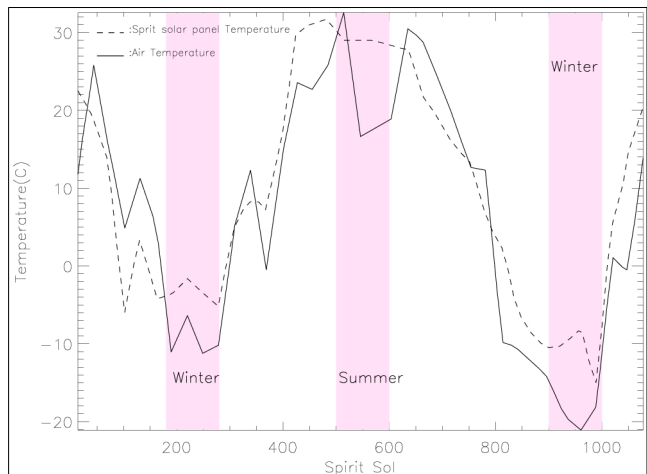
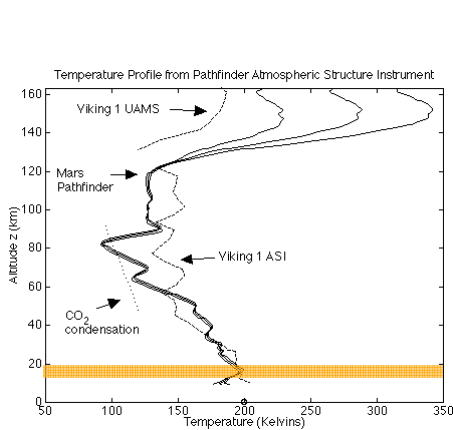


그림 3. 왼쪽) 수직 온도분포 그래프 (Mars Pathfinder/JPL/NASA)

오른쪽) Spirit이 측정한 겨울과 여름의 기온이다. 점선은 Spirit의 태양 전지판의 온도이고 실선은 Spirit이 위치한 곳에서 측정한 대기 온도이다. (고도 약 1km에서 측정한 온도) Solstices 에 대한 설명 (Mars Exploration Rover/JPL/NASA)

2. 먼지 폭풍의 발생 장소 및 시기

생날짜 (지구 시간 기준) 정보이다. A 지역은 Gusev Crater에서 발생한 먼지 폭풍으로 지구 토네이도의 약 10배 크기였던 것으로 추정된다. Gusev Crater는 직경 약 166km로 30 ~ 40억년 전에 생성된 것으로 추정하고 있으며, 900m 이상의 퇴적물이 쌓여있는 지역이다 (Wikipedia).

2.1 화성 먼지 폭풍의 발생 지역

그림 4는 먼지 폭풍 발생 지역을 화성 지도에 표시한 것이며 표 1은 각 발생지역의 위치와 발

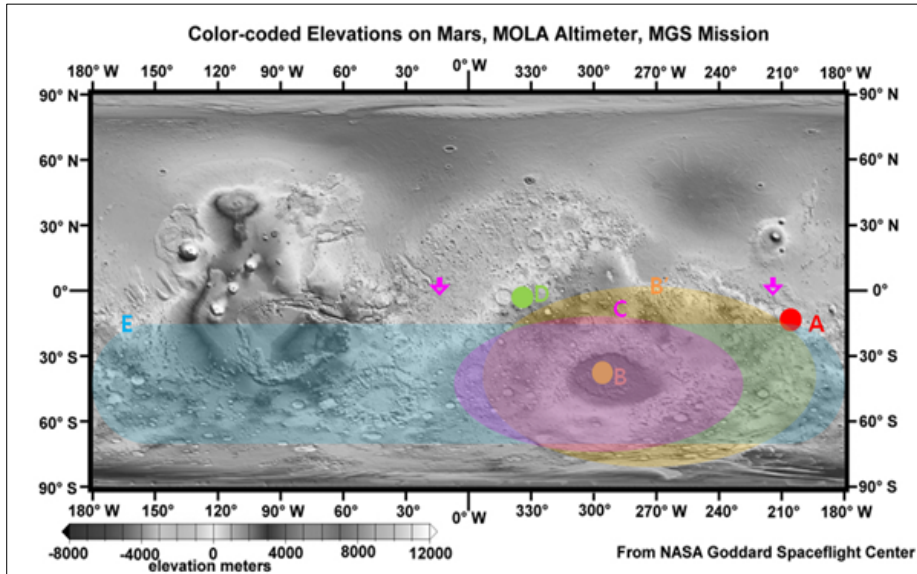


그림 4. 화성의 먼지 폭풍이 발생했던 위치를 화성 지도위에 나타낸 것이다.

표 1. 그림 4에서 보여준 먼지 폭풍의 위치 정보, 화성의 계절과 발생 날짜 등을 나타낸 것이다.

구분	발생위치 (경도, 위도)	발생날짜	계절	비고
A	175.4°E 14.5°S	2005. 3. 15	남반구 여름 (Ls=177°)	Gusev Crater 지구 토네이도의 10배 크기 NASA Science News (2005. 7. 14)
B	70.0°E 42.7°S	2003. 7. 2~6	남반구 여름 (Ls=218°)	Hellas Basin NASA Science News (2003. 7. 9)
B'	10~160°E 0~70°S	2001. 6. 26	봄, 가을 (Ls=186°)	Hellas Basin 상공에서 dust swirl 발생 NASA Science News (2001. 7. 16)
C	354° ~137.5°E, ~2°S	2012. 11. 18	봄, 가을 (Ls=211°)	NASA Photojournal (2012. 11. 21) 화살표는 오픈튜니티와 큐리어스티의 착륙지
D	25°E 2.5°S	2004. 12. 20	북반구 여름 (Ls=135°)	Terra Meridiani OMEGA strom Spiga et al. (2013)
E	남반구 전지역	2007. 7. 15	남반구 여름 (Ls=276°)	전체적인 Dust opacity가 높게 나타남 NASA Science News (2007. 7. 20)

2001년도 B' 지역에서 발생한 화성 먼지 폭풍은 넓은 영역으로 번지기전에 B지역에 속하는 Hellas Basin 상공에서 dust swirl을 만들기도 하였다. 또한 B' 지역에서 발생한 먼지 폭풍은 먼지의 양도 많았고 넓은 영역을 덮은 모래폭풍으로서 지금까지도 많은 연구가 진행되고 있는 사건이었다. B' 지역에 발생한 먼지 폭풍은 그림 5에서 다시 언급하여 설명하고 있다. Hellas Basin은 7000m 이상의 깊이와 직경이 약 2300km 정도가 되는 태양계에서 가장 큰 충돌 지형으로 약 4억년 전에 생성된 것으로 추정된다 (Wikipedia). C 지역의 먼지 폭풍은 비교적 최근에 발생한 사건으로 Mars Reconnaissance Orbiter에 의해 관측되었다. D 지역의 먼지 폭풍은 Mars Express에 탑재된 OMEGA라는 기기에 의해 관측되었기 때문에 "OMEGA storm"이라고 부른다. 3일 만에 먼지에 의한 광학적 두께가 10배 이상이 되는 진행속도가 빠른 먼지 폭풍이었다 (Spiga et al. 2013). 발생 지역은 Terra Meridiani 안에 위치하는 곳에서 시작되었다. E는 발생한 시점부터 계속 먼지 농도가 짙어지기 시작하더니, 2007년

7월에는 화성 남반구 전체를 덮친 먼지 폭풍이었다.

2.2 화성 먼지 폭풍과 표면 온도

화성의 먼지 폭풍은 앞서서도 언급했지만 대기 대순환과 관련이 있다. 대기 대순환은 기본 에너지원이 태양이기 때문에 천구상에서 태양과 화성의 위치, 즉 화성 계절이 큰 영향을 준다고 추정할 수 있다. 표 1에는 먼지 폭풍 발생 당시의 화성의 계절을 표기 하였다.

그림 5의 a)는 2001년 발생한 먼지 폭풍의 발달 과정을 먼지 농도로 나타내고 그에 따른 표면 온도 변화를 나타낸 것이다. 그림 5의 b)는 Mars Global Surveyor에 탑재된 TES (Thermal Emission Spectrometer)에 의해 촬영된 것으로 2001년 6월 26일부터 전체적인 온도가 상승하고 그 후 대기 먼지 농도가 올라가는 것을 볼 수 있다. 특정한 지역에서 온도가 상승함에 따라 대기 운동이 활발해지고 이와 함께 대기중의 먼지 농도도 높아지는 것을 알 수 있다.

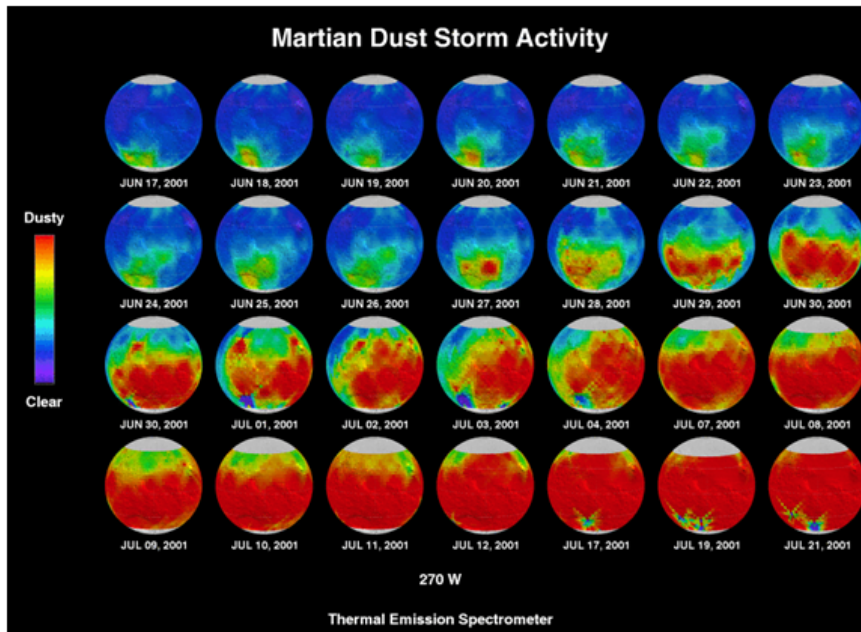


그림 5. a) MGS/TES에 의해 관측된 화성 대기의 먼지 농도 (ASU/JPL/NASA)

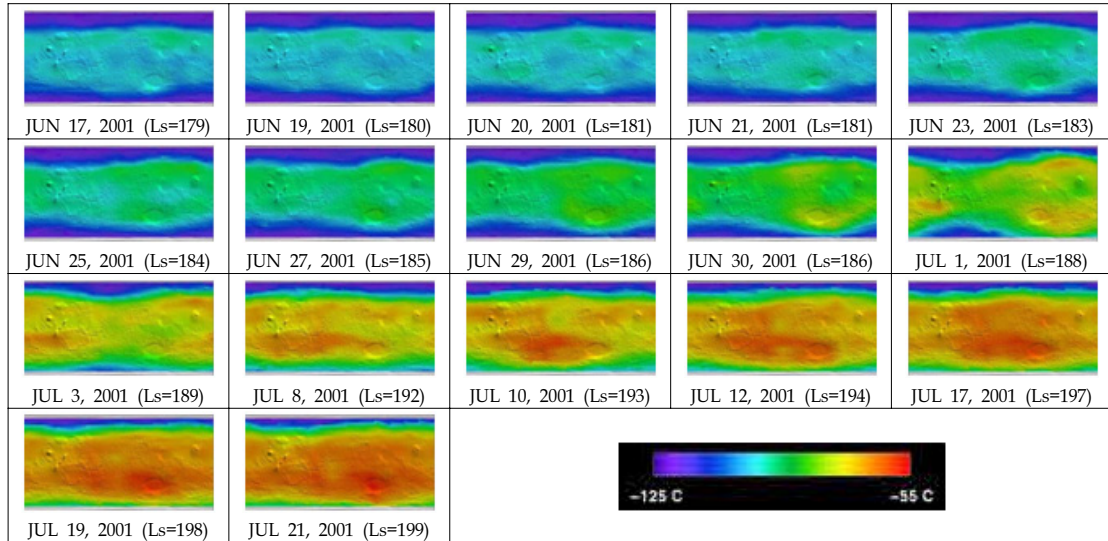


그림 5. b) MGS/TES에 의해 관측된 화성 대기의 온도 분포 영상이다. 고도 약 15km 상공의 대기 온도를 위도 $-60^{\circ}\sim 60^{\circ}$, 경도 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 에 걸쳐 나타내고 있다. (ASU/JPL/NASA)

먼지 폭풍이 온도와 관련이 있다는 또 하나의 증거는 Mars Express의 PFS (Planetary Fourier Spectrometer) 자료에서 유도한 온도 분포 그림에서 알 수 있다 (그림 6).

그림 6은 먼지 폭풍 내부에서 측정한 온도와 먼지가 없는 곳에서 측정한 온도의 수직 분포이다. 먼지 폭풍이 발생한 지역의 온도가 발생하지 않은 지역보다 약 20K 높은 것을 알 수 있다.

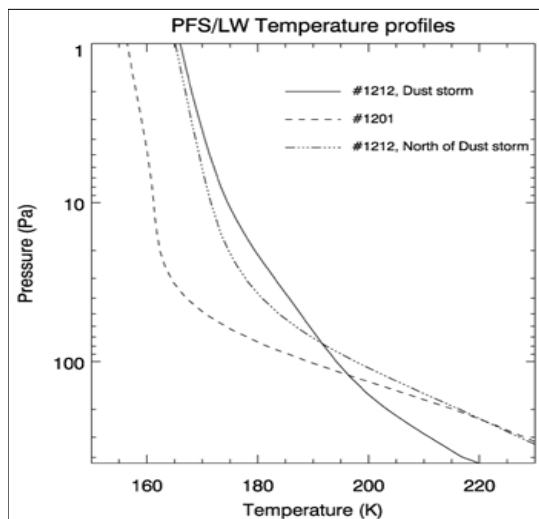


그림 6. 먼지 폭풍이 일어나는 내부에서 측정한 온도와 먼지 폭풍이 없는 지역에서 측정한 온도 분포 (Määttänen et al. 2009). "#번호"는 Mars Express의 공전 횟수이다.

3. 화성 먼지 폭풍의 원인

대기 대순환의 역할은 구면인 천체가 태양열에 의해 부등가열 됨에 따라 발생하는 온도 불균형을 맞추기 위한 것이다. 따라서 온도차가 크면 클수록 대기의 운동은 활발해진다. 화성의 먼지 폭풍은 화성 대기 대순환 과정에서 발생하는 현상이라고는 알려져 있다. 하지만 화성의 GCM (Global Circulation Model) 등을 통해 연구가 진행되고 있으나 대기와의 역학 관계를 명확하게 풀지 못했을 뿐만 아니라, 먼지 폭풍의 지속 시간 또한 파악하지 못하고 있는 상태이다.

Spiga와 Lewis (2010)는 10~100km 규모에 해당하는 전구순환 모델 (GCM)을 수행하였다. 표면 근처의 바람은 밤, 낮에 관계없이 지형의 영향을 받고 있으며, 지형이 험할수록 먼지가 쉽게 상승한다는 것을 보여주었다. 모래 바람과 와류가 주가 되는 1~10km의 작은 규모 모델에서는

대류에 의한 소용돌이가 먼지를 대기 중으로 주입시키고 상승시키는 원인이 된다고 하였다. 대류에 의한 소용돌이는 경계면의 두께와 마찰 속도와 관계가 있으며, 이로 인해 높은 고도에서도 먼지 바람이 존재할 수 있다는 것을 보여주었다. 이런 연구 내용을 바탕으로 Spiga et al. (2013)는 화성의 먼지 바람은 고도 약 15~24km에 분포한다고 하였고, 고도 30~50km에 "rocket dust"라고 불리우는 또 하나의 먼지 층이 있다고 발표하였고, 이 지역에 분포하는 먼지 입자는 제트의 성질을 가지고 있을 것이라고 주장하였다.

Heaven et al. (2011)은 북반구가 여름인 시기에 먼지 농도를 고도별로 계산하여, 먼지의 mixing ratio가 가장 높은 고도는 약 15~25km임을 밝혔다. 그리고 그 고도를 HATDM (High-Altitude Tropical Dust Maximum)이라고 부른다. HATDM의 원인은 태양열에 의해 먼지 입자가 열을 받아 먼지가 상승한 것이라고 보고 있다.

Montabone (2006)등은 먼지 폭풍의 시작 및 발달과정에 표면의 바람 세기와 바람에 의한 응력이 연관이 있다는 연구를 하였고 (그림 7), 바람은 화성 대기 대순환과 연관이 있다고 주장하였다. 그림 7에서 가운데 그림은 바람의 세기를 나타내는 그림이고 아래 그림은 바람에 의한 응력, 위의 그림은 먼지의 광학적 두께를 나타내는 그래프이다. 이를 통해 바람의 세기가 세지면 응력이 커지고 그에 의해 먼지가 상승하여 먼지 농도가 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 "dust devil"의 시초가 되는 국지적인 먼지 폭풍은 대기의 와류에 의해 부유하게 된 먼지들이 그 원인이라고 할 수 있다고 하였고, 이러 현상들은 대기 온도 차이에 의해 발생한다는 연구를 진행하였다. Renno et al. (1998)는 "dust devil"에 대한 간단한 모델을 만들어서 연구하였는데 먼지 폭풍과 마찬가지로 바람의 응력과 관계가 있다고 하였고, 따라서 dust devil의 수직 분포 방향을 보면 바람의 응력과 같은 방향이라고 연구하였다.

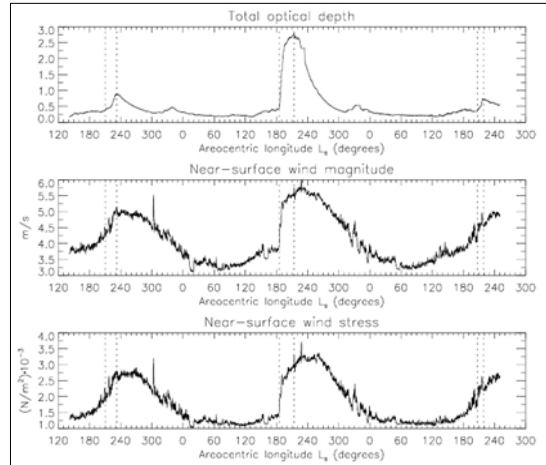


그림 7. 바람의 세기와 응력을 나타내고 (가운데, 아래), 그에 따른 먼지 농도 (위)를 나타낸 그림이다. (Montabone 2006)

4. 토 론

지구의 사막에서 발생하는 먼지 폭풍과는 그 규모가 매우 다른 화성의 먼지 폭풍은 그 에너지도 클 것이라고 예상된다. 큰 에너지에 의해 부유되는 입자는 크기가 미세한 것부터 모래 알갱이 크기까지 다양할 것이라고 예상된다. 이런 먼지 폭풍은 물리적으로 전기적으로 탐사를 위한 기기에 영향을 줄 것으로 예상된다.

본 연구에 따르면 화성의 먼지 폭풍은 대기의 온도와 관계가 있다고 볼 수 있다. 화성은 화성의 봄이나 여름에는 화성시 오전 10시 무렵이 되면 땅이 데워지기 시작해서 화성시 오후 3시가 되면 식기 시작한다. 따라서 이 시간대는 하루 중에서 화성의 먼지 폭풍이 발생할 가능성이 높은 시기이다. 또한 남반구의 여름에 주로 발생하기 때문에 그 시기도 예측하여 착륙을 시도할 수 있다.

실제로 착륙한 탐사선들의 착륙시점을 보면 NASA의 Pathfinder는 화성의 여름에서 가을로 넘어가진 시점(대략 $L_s=130^\circ$) 이고, Curiosity는 화성 가을(대략 $L_s=179^\circ$), Spirit과 Opportunity는 화성의 겨울에서 봄으로 넘어가는 시기(대략

LS=329°)로 여름을 피해서 착륙을 시도한 것을 볼 수 있다.

Seo et al. (2012)는 국내 자력으로 화성 탐사를 시도할 때 과학적으로 적합한 착륙지 선정에 대한 연구를 수행한 적이 있다. 향후 이 착륙지들 중에서 선정하여 착륙을 시도할 때 화성의 여름 시기(Ls=90° 전후)에 화성시 오전 10시부터 화성시 오후 3시를 피해서 착륙을 시도하면 비교적 먼지 폭풍으로부터 안전한 시간대에 접어들 것이라고 판단된다.

참 고 문 헌

1. Bagenal, "Planetary Atmosphere ASTR3720", Spring Class at University of Colorado, 2005 <http://lasp.colorado.edu/~bagenal/3720/index.html>
2. Beatty, J.K., Chaikin A., "The New Solar System", Cambridge, Sky Publishing Corporation and Cambridge University Press, 1990, p 97
3. Heavens, N.G., Richardson, M.I., Kleinb?hl, A. et al., "Vertical distribution of dust in the Martian atmosphere during northern spring and summer: High-altitude tropical dust maximum at northern summer solstice", Journal of Geophysical Research, vol.116, 2011, E01007
4. Määttänen, A., Fouchet, T., Forni, O. et al., "A study of the properties of a local dust storm with Mars Express OMEGA and PFS data", Icarus, vol.201, 2009, pp.504-516
5. Montabone, L., Lewis, S.R., Read, P.L., "Results of dust storms and stationary waves in three Mars years of data assimilation", In: Second Workshop on Mars atmosphere modeling and observations, 27 Feb. ~ 3 Mar. 2006, Granada, Spain
6. Rennó, N.O., Burkett, M.L., Larkin M.P., "A simple thermodynamical theory for dust devil", Journal of the Atmospheric Sciences, vol.55, 1998, pp.3244-3252
7. Seo, H., Kim, E., Kim, J.H. et al., "A case study in the Mars landing site selection for science objects", Journal Astronomy and Space Science, vol.29, 2012, pp.375-380
8. Spiga A., Lewis S.R., "Martian Mesoscale and Microscale wind Variability of Relevance for Dust Lifting", The International Journal of Mars Science and Exploration, vol. 5, 2010, pp.146-158
9. Spiga, A., Faure, J., Madeleine, J.-B. et al., "Rocket dust storms and detached dust layers in the Martian atmosphere", Journal of Geophysical Research: Planets, vol.118, 2013, pp.746-767
10. "Mars Exploration Rover/JPL/NASA" <http://marsrovers.jpl.nasa.gov/spotlight/20070612.html>
11. "Mars Viewer" http://pds-rings.seti.org/cgi-bin/tools/viewer2_mars.pl
12. "Martian Seasons and Solar Longitude" http://www-mars.lmd.jussieu.fr/mars/time/solar_longitude.html
13. "NASA Science News (2001. 7. 16)" http://scienc.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2001/ast16jul_1/
14. "NASA Science News (2003. 7. 9)" http://science.nas.gov/science-news/science-at-nasa/2003/09jul_marsdust/
15. "NASA Science News (2005. 7. 15)" http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/science-al-2005/14jul_dustdevils/
16. "NASA Science News (2007. 7. 20)" http://science.nas.gov/science-news/science-at-nasa/2007/20jul_duststrom/
17. "NASA Photojournal" <http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA16450>
18. "Solar System Simulator"

- <http://space.jpl.nasa.gov>
19. "TES team" <http://tes.asu.edu>
 20. "Wikipedia/Gusev Crater"
[https://en.wikipedia.org/wiki/Gusev_\(Martian_crater\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Gusev_(Martian_crater))
 21. "Wikipedia/Hellas_Planitia"
http://en.wikipedia.org/wiki/Hellas_Planitia