

달착륙선 충격흡수 착륙장치 개발동향

김원석*, 김선원*, 황도순*

Development Trend of Shock-Absorbing Landing gear for Lunar Lander

Kim, Won-Seock*, Kim, Sun-Won*, Hwang, Do-Soon*

ABSTRACT

The soft landing of a lunar lander after the entrance of lunar orbit is an essential prerequisite for the accomplishment of the lander's lunar mission. During the landing process of a lunar lander, efficient shock absorption and stability maintenance are indispensable technology to protect payloads. Therefore, the landing gear is a crucial structural component of a lunar lander, it has to absorb the kinetic energy associated with touchdown and support the static load of the landing module in an upright position. In this paper, various landing gears of lunar landers which are being developed as well as which had been successfully landed on the moon surface are investigated. In the end, the Korean lunar lander, which is being designed for preliminary development model, is presented as an example of the lunar lander development.

초 록

달착륙선이 주어진 임무를 수행하기 위해서는 달궤도 진입 후 성공적인 착륙이 보장되어야 한다. 착륙환경에서 발생하는 높은 충격하중 하에서 착륙선 본체 및 탑재체의 파손을 막기 위해서는 높은 충격흡수율 및 자세안정성이 요구된다. 따라서 착륙 시 발생하는 충격을 효과적으로 흡수하면서 기체의 전복 및 쓰러짐을 막을 수 있는 착륙장치는 달착륙선의 핵심 구성요소이다. 본 논문에서는 현재까지 달착륙에 성공한 달착륙선과 현재 개발단계에 있는 달착륙선을 대상으로 다양한 착륙장치 설계안들을 검토 및 비교하였으며, 현재 진행되고 있는 한국형 달탐사선 예비설계 요구조건에 부합하는 착륙장치의 요구조건 및 이를 충족시킬 수 있는 착륙장치 설계에 대한 예를 제시하고자 한다.

Key Words : Lunar lander(달착륙선), Landing gear(착륙장치), Shock-absorption(충격흡수)

* 김원석, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
goodman@kari.re.kr

* 김선원, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
sunwkim@kari.re.kr

* 황도순, 한국항공우주연구원 위성연구본부 위성기술실 위성구조팀
dshwang@kari.re.kr

1. 서 론

달에 처음으로 착륙한 우주선은 구소련의 Luna-9 으로서 1966년 달착륙에 성공하여 달표면 지형정보를 담은 사진을 지구로 전송하였다. 같은 해 미국의 Surveyor-1 또한 무인 달착륙에 성공하였다. 그 후 미국은 Surveyor-3,5,6,7 을 성공적으로 달에 착륙시켰으며, 1969년 Apollo-11 을 통해 유인 달착륙에도 성공하였다. 달착륙선 개발은 1976년 0.17kg 의 달 샘플을 가지고 지구로 귀환한 무인 달착륙선 Luna-24 이후 현재까지 시도되지 않았다 [1]. 21세기 이후 달에 궤도선을 보내 달표면 관측 및 성분조사 등의 달탐사 활동이 우주강국들에 의해 활발히 재개되어 왔으나 달에 착륙하는 임무를 갖는 우주선의 발사는 아직 재개되지 못하였다. 그러나 현재 많은 우주강국들이 달착륙선을 개발하고 있으며, 월면차를 운영함으로써 다양한 지역의 영상정보를 획득하고 달 샘플을 현장에서 분석하는 임무를 설정하였다 [2-6]. 표1은 21세기 이후 달궤도 진입에 성공한 궤도선의 목록을 표2는 달표면에 착륙을 목표로 현재 개발단계에 있는 착륙선의 목록을 나타낸다.

표 1. 21세기 이후 달궤도 진입에 성공한 달궤도선

Lunch Date	Lunar Orbitor	Mass (kg)	Mission	Country
2003-09-27	SMART-1	367	달표면 관측	Sweden
2007-09-14	Selene	2,914	달표면 관측 및 성분조사	Japan (JAXA)
2007-10-24	Chang'e-1	2,350	달표면 관측 및 성분조사	China (CNSA)
2008-10-22	Chandrayaan-1	675	달표면 관측 및 성분조사	India (ISRO)
2009-06-18	LRO/LCROSS	2,870	달표면 관측 및 물 존재 증거확보	U.S. (NASA)
2010-10-01	Chang'e-2	2,550	달표면 관측 및 성분조사	China (CNSA)

표 2. 현재 개발단계에 있는 달착륙선

Lunch Year (Plan)	Lunar Lander	Mission Type	Country
2012	Luna-Glob	Orbiter, Lander, Penetrator	Russia (Roscosmos)
2013	Chang'e-3	Lander, Rover	China (CNSA)
2013	Chandrayaan-2	Orbiter, Lander, Rover	India (ISRO)
2015	SELENE-2	Orbiter, Lander, Rover	Japan (JAXA)

달착륙선은 달궤도선과 달리 달궤도 진입 이후 성공적인 착륙이 보장되어야 주어진 임무 수행이 가능하다. 착륙환경에서 달착륙선은 높은 충격하중에 노출되는데 이로 인한 탑재장비의 파손을 막고 착륙선 본체의 전복 및 쓰러짐을 방지할 수 있는 착륙장치는 착륙선의 필수적인 구성요소이다 [7-11]. 착륙선에 전달되는 충격하중이 탑재장비로 전달되지 못하도록 착륙장치에는 연착륙(soft-landing)을 위한 충격흡수 메커니즘이 구현되는데, 달의 진공환경으로 인하여 달착륙선에는 자동차, 항공기에 일반적으로 사용되는 유압식 충격흡수 메커니즘을 사용할 수 없다. 또한 충격흡수 시스템을 최적화하기 위해서는 달토양의 기계적 물성정보와 함께 달표면과 착륙선이 접촉하는 순간의 속도 및 접촉각 정보가 필요하지만 이러한 자료는 확률론적으로 예상할 수밖에 없다. 달착륙에 성공한 미국의 경우 충격흡수 착륙장치 설계를 위하여 수치해석적으로 착륙거동을 시뮬레이션 함과 동시에 1/6-크기((1/6)3-무게)의 지상시험모델을 제작하여 착륙시험을 수행함으로써 착륙장치의 설계를 최적화 하였다 [7]. 최근의 달착륙선 개발연구는 진보된 추진 및 자세제어 기술을 사용하여 설정된 착륙지점의 지형 확인 후 원하는 위치에 정확히 착륙시키고자 하는 시도가 진행되고 있으며 저비용으로 달탐사를 수행할 수 있는 경량화된 구조체를 지향하고 있다 [8-10]. 충격흡수 착륙장치 또한 보다 가벼우면서 에너지 흡수량이 큰 효율적인 구조체로 설계되고 있으며, 달착륙선 개발을 위한 핵심기술

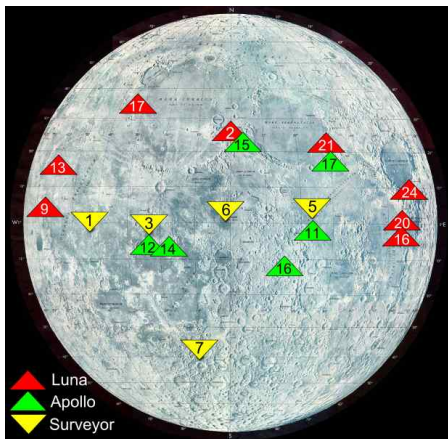
로 간주되고 있다 [9-11].

본 논문에서는 현재까지 달착륙에 성공한 달착륙선과 현재 개발단계에 있는 달착륙선을 대상으로 다양한 충격흡수 착륙장치 설계안들을 검토 및 비교하였으며, 현재 진행되고 있는 한국형 달탐사선 예비설계 요구조건에 부합하는 착륙장치의 요구조건 및 이를 충족시킬 수 있는 착륙장치 설계에 대한 예를 제시하고자 한다.

2. 착륙 성공 착륙장치 분석

2.1 착륙장치 구조 비교

본 장에서는 달착륙에 성공한 착륙선의 착륙장치 구조를 충격흡수 메커니즘에 초점을 맞추어 비교하였다. 현재까지 달착륙에 성공한 우주선은 구소련의 Luna, 미국의 Surveyor 와 Apollo 가 있으며 그림 1은 각각의 우주선이 달에 착륙한 착륙지점들을 나타낸다.

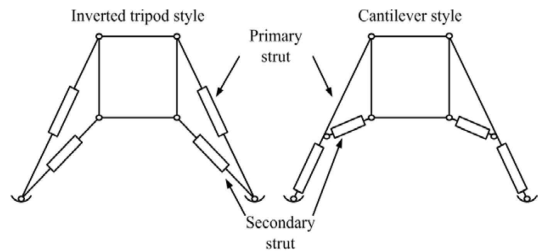


자료: 참고문헌 [3]

그림 1. Lunar landing site map

현재까지 달착륙선에 사용된 모든 착륙장치의 구조는 그림 2에 묘사된 2가지 형태의 트러스 구조로 구분될 수 있다. 구소련의 Luna, 미국의 Surveyor 와 Apollo 의 착륙장치는 모두 트러스 구조로 설계되었는데 Luna 와 Surveyor 는 Inverted tripod 형으로, Apollo 는 Cantilever 형으로 설계되었다. Inverted tripod 형은 주지주와 보조지주가 모두 착륙패드

에 연결되어 있는 형태로 착륙시 발생하는 하중을 주지주와 보조지주 모두에 고르게 분산시킬 수 있어 주지주와 보조지주의 구분이 불필요한 구조이다. Cantilever 형은 주지주의 중간에 보조지주가 연결되어 있어 주지주만 착륙패드에 연결되며 주지주가 일차적으로 착륙시 발생하는 압력을 지지하고 보조지주는 주지주를 통해 전달되는 하중을 지지하면서 주지주의 자세를 유지시켜주는데 이때 보조지주는 착륙자세에 따라 압축하중뿐 아니라 인장하중도 받을 수 있다.



자료: 참고문헌 [8]

그림 2. Typical landing gear style

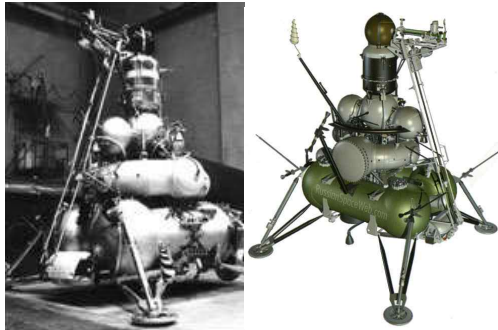
착륙시 발생하는 충격을 흡수하기 위해 Surveyor 와 Apollo 는 정해진 압력을 받으면 압착되는 알루미늄 허니콤을 트러스 내부에 삽입하여 트러스 길이가 줄어들면서 에너지를 흡수하는 메커니즘을 구현하였다. 표3은 착륙선들의 착륙장치 구조를 정리한 자료이며 달착륙선 각각의 구체적인 특성과 성능 검토는 이어지는 절에 정리하였다.

표 3. 달착륙에 성공한 달착륙선의 착륙장치 구조

Lunar Lander	Success (failure)	Leg Type & Material	Shock Absorber
Luna	8 (6)	4 Leg Truss (Inverted tripod)	unknown
Surveyor	5 (2)	3 Leg Truss (Inverted tripod) AL7075	Crushable aluminum foam & comb
Apollo	6 (1)	4 Leg Truss (Cantilever) AL7079, AL7178	Crushable aluminum honeycomb

2.2 Luna

구소련은 무인 달탐사 계획인 Luna 를 통하여 1959-1976년 사이에 공식적으로 24기의 달탐사선(궤도선 및 착륙선)을 개발하였다. 1966년 2월 Luna-9 은 세계 최초로 달착륙에 성공하였으며 1966년 3월 발사된 luna-10 은 인류 최초의 달궤도 인공위성이 되었다. 최초의 달샘플 채취 및 지구전송은 Apollo-11 성공의 이듬해인 1970년 Luna-16 에 의해 무인으로 이루어졌으며, 1976년 Luna-24 에 의한 무인 달샘플 채취를 마지막으로 Luna 계획은 종료되었다 [1,12]. Luna 의 설계 및 기술 자료는 여전히 공개되어있지 않으며 그림 2 는 Luna-24 의 모습을 나타낸다. 4,800kg 질량의 착륙선을 착륙시 발생하는 충격하중으로부터 보호하기 위하여 4개의 다리가 트러스 구조로 설계되었으며 각각의 다리는 3개의 지주로 구성된 inverted tripod 형이었음을 알 수 있다.



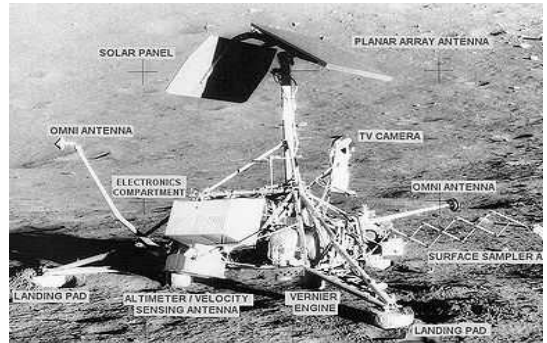
자료: 참고문헌 [12]

그림 2. Luna 24; launch testing & redrawn model

2.3 Surveyor

미국의 달착륙선 Surveyor 는 연착륙(soft landing) 기술을 획득하고 달토양의 물리적인 특성을 조사하는데 목적이 있었는데 이는 유인 착륙선인 Apollo 의 안전한 착륙을 위한 자료를 획득하고자 함이었다. Surveyor 는 총 7번의 발사 중 5번 연착륙에 성공하였고 2번은 달표면에 충돌하였다. 7차례의 착륙시도는 모두 달궤도 운행을 거치지 않고 지구에서 달로 향해 후 바로 착륙이 시도되었으며 2.6km/s 의 항해속도에서 달고도 75.3 km 지점부터 추진기를 이용한 감속이

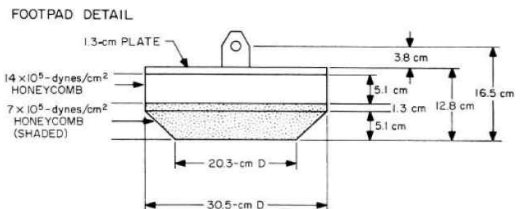
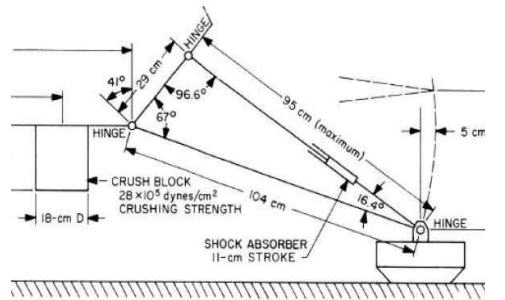
시작되어 착륙순간에는 3m/s 정도의 속도를 가졌다 [13-15]. 그림 3은 Apollo-12 에 의해 촬영된 Surveyor-3 를 보여준다. 착륙장치는 3개의 다리로 이루어 졌으며 inverted tripod 형의 트러스 구조임을 알 수 있다.



자료: 참고문헌 [14]

그림 3. Surveyor-3 viewed by Apollo-12 astronauts

그림 4는 Surveyor 의 착륙장치 치수를 보여준다. 착륙선 본체와 착륙패드 아래에 알루미늄 폼과 허니콤을 부착하였으며 특정압력에서 압착되도록 설계하여 충격을 흡수할 수 있도록 하였다 [13].



자료: 참고문헌 [13]

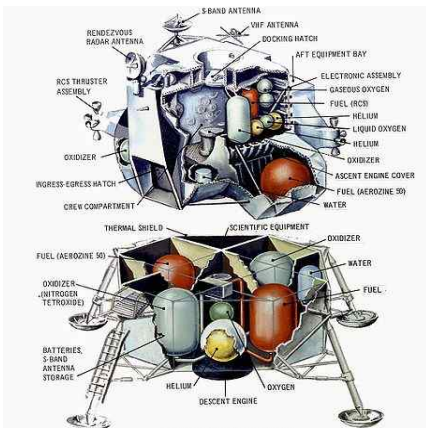
그림 4. Landing gear of surveyor

3개의 다리는 모두 주지주 1개와 보조지주 1개로 이루어졌으며 주지주는 내부에 삽입된 알루미늄 폼이 충격을 흡수하면서 압착되는데 최대 11cm 까지 길이가 줄어들 수 있도록 설계되었다. 주지주의 길이변화가 최대 수축길이인 11cm 에 도달하면 착륙장치의 다리는 달표면과 평행하게 되어 본체 아래에 부착된 알루미늄 폼도 완전히 수축되게 된다.

달착륙에 처음 성공한 Surveyor-1 은 발사될 때 총 질량이 995.2 kg 이었으며 연료가 소진되고 착륙할 때의 질량은 294.3 kg 이었다. 착륙 시점의 Surveyor-1 의 속도는 수직속도 3.6m/s 수평속도 0.3m/s 로 관측되었다 [15].

2.4 Apollo

세계 최초의 유인 달착륙선인 Apollo 의 착륙장치는 4개의 전개형 다리로 구성된 트러스 구조이며 주지주의 중간에 보조지주가 연결되어있는 Cantilever 형이다. 그림 5는 Apollo-11 착륙선의 구조를, 표 4는 질량 정보를 보여준다 [16]. 설계 초기에는 5개 또는 6개의 다리로 구성된 inverted tripod 형의 착륙장치도 고려되었으나 최종적으로 cantilever 형이 선정된 것은 착륙장치 자체의 성능을 위해서가 아니라 cantilever 형 설계가 착륙장치의 크기를 줄이고 다리 전개 전 접힌 상태에서도 작은 공간을 차지하여 발사체 탑재공간을 효율적으로 사용할 수 있도록 해주기 때문이었다 [7].



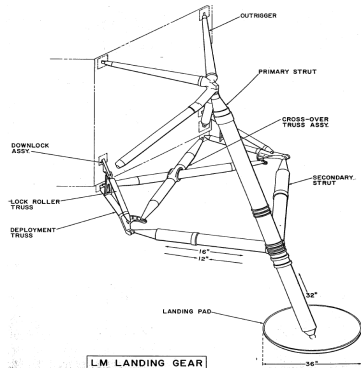
자료: 참고문헌 [16]

그림 5. Apollo lunar module structure

표 4. Apollo-11 Lunar module 의 질량 분포

Lunar Module subsystem		Mass (kg)
Dry mass	ascent stage	2,180
	descent stage	2,034
Propellant mass	ascent stage	2,639
	descent stage	8,212
Total		15,065

그림 6은 Apollo 착륙선의 착륙장치를 구성하는 4개의 다리 중 1개만을 상세히 본 모습이다. 보조지주 안쪽에 연결되어 있는 트러스 구조가 회전하면 주지주는 발사체 내부에서 지면과 90° 이상 안쪽으로 접혀질 수 있으며 전개 후에는 잠금장치가 작동하여 접혀지는 것을 막는다 [7]. 주지주와 보조지주 모두 내부에는 알루미늄 허니콤이 삽입되어 있어 압력을 받으면 압착되면서 트러스 길이가 줄어들고 이 과정에서 충격 에너지가 알루미늄의 소성변형 에너지로 전환된다.



자료: 참고문헌 [7]

그림 6. Landing gear of lunar module of Apollo

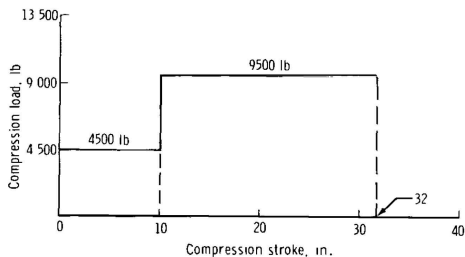
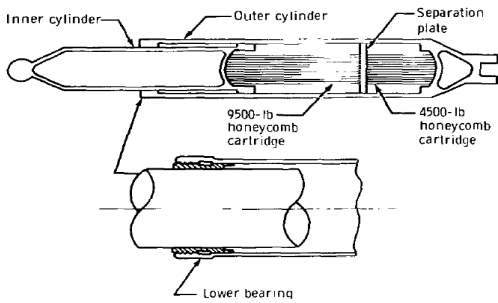
주지주와 보조지주는 모두 2개의 실린더가 결합된 형태인데 내부 실린더가 외부 실린더로 밀려들어가면서 내부의 알루미늄 허니콤이 압착된다. 그림 7과 8은 주지주와 보조지주의 내부 구조 그리고 허니콤의 압착 길이 변화에 따른 압축하중 변화를 보여준다. 주지주는 압축하중 에너지를 흡수하기 위한 허니콤이 4500, 9500 lb 하중에서 단계적으로 작동되도록 2종으로 나누어져 삽입되었으며, 보조지주는 압축하중 4500 lb,

인장하중 5000 lb 이상의 하중이 가해지면 에너지를 흡수하도록 허니콤이 삽입되어있다 [7]. 충격흡수 메커니즘 구현을 위해 알루미늄 허니콤이 사용된 가장 큰 이유는 가벼우면서 에너지 흡수량이 많기 때문이었다. 또한 착륙은 1회만 이루어지기 때문에 재료에 소성 변형을 일으키면서 에너지를 흡수시켜 착륙장치 구조체에 영구변형을 남겨도 달착륙선 임무수행에는 문제를 일으키지 않는다. 이상과 같은 충격흡수량 설정 및 알루미늄 허니콤 설계가 나온 근거는 확률적인 계산과정을 거쳐 착륙선의 착륙시점 수직속도(V_v)와 수평속도(V_h)가 다음과 같은 속도범위를 넘어서지 않을 것으로 예측하였기 때문이다.

$$\text{For } V_v \leq 7, V_h = 4 \quad (m/s)$$

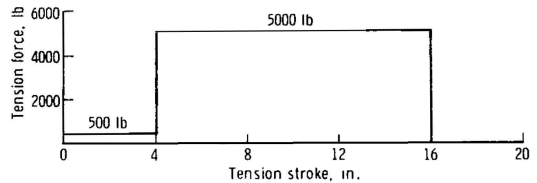
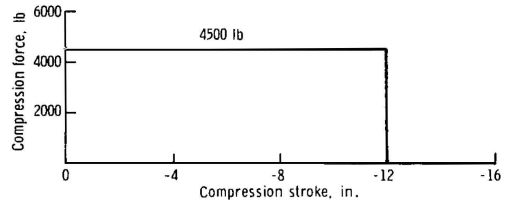
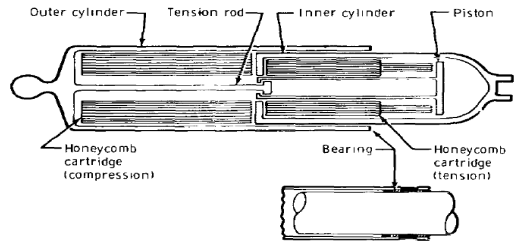
$$\text{For } 7 \leq V_v \leq 10, V_h = \frac{40}{3} - \frac{4}{3} V_v$$

착륙장치의 모든 트러스는 알루미늄 합금(AL7079, AL7178)으로 제작되었다. 착륙장치는 1/6-크기((1/6)3-무게)의 착륙선 지상시험모델을 이용하여 검증되었으며, 설계시 안전계수 값은 1.35가 사용되었다 [7].



자료: 참고문헌 [7]

그림 7. Inside view of a primary strut



자료: 참고문헌 [7]

그림 8. Inside view of a secondary strut

3. 개발 중인 착륙장치 분석

3.1 Luna-Glob

2012년 발사를 앞두고 있는 무인 달탐사선 Luna-Glob는 무인 달착륙선 개발기술 분야에서 선두 주자였던 러시아가 21세기 이후 또다시 가장 먼저 달 착륙선 개발에 복귀한다는 역사적 의미를 갖는다. 과거 냉전체제 속에서 미국과 경쟁구도로 진보된 우주기술이 이번 사업에서는 미국, 중국, 인도, 일본, 유럽 국가들과 협력관계로 개발되고 있다 [17]. 달탐사선 Luna-Glob는 궤도선, 착륙선 그리고 다수의 충돌선으로 구성되는데 달착륙선은 달의 극지방에 착륙하여 달 토양에 함유된 물을 비롯한 휘발성 물질비율을 측정하고 달토양의 구성성분 또한 분석할 계획이다. 달 극지방의 지질자원 조사는 착륙선에 탑재된 장비들을 이용하여 현장에서 이루어지는데 분석자료는 궤도선의 중계를 통해 지구로 전송된다 [18]. 그림 9는 Luna-Glob

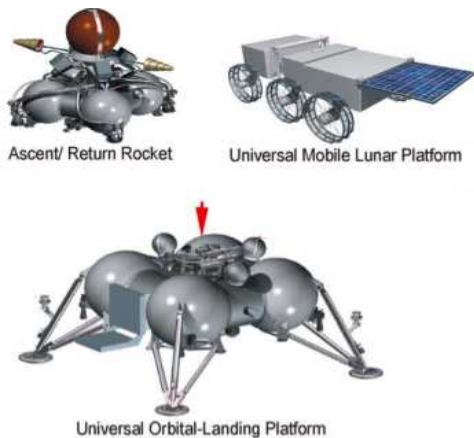
착륙선의 구조를 나타내는데 40년 전 구소련의 달착륙선 Luna 와 같이 연료탱크가 노출되어 있으며 착륙장치는 연료탱크에 다리가 바로 연결된 inverted tripod 형 트러스 구조이다. Luna-Glob 의 발사 시 질량은 8,120 kg 이며 추진제를 소모한 후 달궤도 진입 시 질량은 2,320 kg 이다.



자료: 참고문헌 [19]

그림 9. Luna-Glob lander

러시아는 장기적인 달탐사 및 화성탐사 계획들을 진행하고 있는데 샘플 채취선이나 월면차 등 다양한 탐재장비들을 착륙시키는 착륙장치의 기본구조는 동일한 형태로 유지할 계획이다 [19,20]. 그림 10은 러시아에서 계획하고 있는 모든 달 및 행성착륙선에 사용될 착륙장치의 구조를 보여준다.



자료: 참고문헌 [20]

그림 10. Universal landing platform of Russia

러시아는 동일한 플랫폼의 착륙장치 구조를 유지함으로써 착륙장치 개발에 소요되는 비용을 줄이고 검증된 착륙장치를 지속적으로 사용함으로써 새로운 설계를 도입함으로써 인한 위험부담도 줄일 계획이다 [20]. 그림 10과 같이 러시아의 착륙장치 플랫폼은 inverted tripod 형으로 설계된 트러스 구조이며 4개의 다리가 노출된 4개의 연료탱크에 바로 연결되어 연료탱크와 착륙장치가 일체형으로 결합된다는 특징이 있다. 각각의 다리는 3개의 지주로 구성되었는데 3개의 지주가 동일한 단면적의 실린더 형태여서 착륙 시 발생하는 충격하중을 3개의 지주가 균등하게 분담할 것임을 예상할 수 있다.

3.2 Chang'e-3

중국에서 2013년 발사를 목표로 개발 중인 달탐사선 Chang'e-3 는 달표면에 착륙할 뿐만 아니라 월면차를 이용하여 달표면에서 달지형을 관찰할 계획이다. 현재 달궤도 상에서 임무수행 중에 있는 Chang'e-2 는 Chang'e-3 가 착륙할 지점을 설정하기 위하여 달지형을 세밀하게 관찰하였으며 현재 중국은 착륙지점을 설정한 상태이다. 달착륙에 경험이 없는 중국으로서는 연착륙기술이 Chang'e-3 개발을 위한 핵심기술이며, 후속 달착륙선인 Chang'e-4 와 Chang'e-5 도 계획 중이라고 발표하였다 [21-23]. 중국은 달탐사선 Chang'e 의 기술자료를 공개하고 있지 않기 때문에 착륙장치 구조에 대해 알 수 없으나 그림 11과 같은 방송에 보도된 모형을 볼 때 전통적인 트러스 구조를 사용했을 것으로 예측된다.

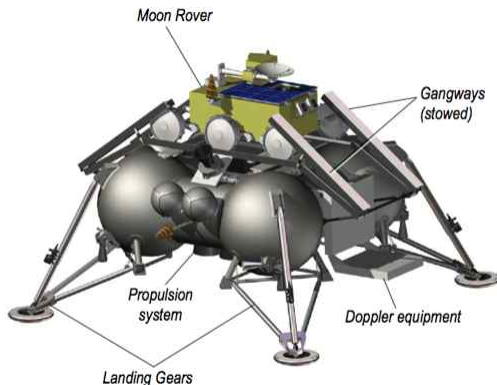


자료: 참고문헌 [21]

그림 11. Chang'e-3 착륙선 모형

3.3 Chandrayaan-2

Chandrayaan-2 는 인도우주연구원(ISRO) 과 러시아 연방우주국(Roscosmos) 이 공동개발 중에 있는 달 탐사선이며 달궤도선만으로 이루어졌던 Chandrayaan-1 과 달리 궤도선과 착륙선으로 이루어져 있다. Chandrayaan-2 착륙선은 월면차를 탑재하고 있어 착륙 후 여러 지역에서 달지형을 관찰하고 달 토양 분석임무 또한 수행할 계획이다. Chandrayaan-2 의 궤도선은 인도에서, 착륙선은 러시아 연방우주국(Roscosmos) 에서 개발을 맡았는데 러시아 내부적으로는 착륙선은 Luna-Resurs 로 명명되었다. Luna-Resurs 의 구조는 Luna-Glob 와 흡사한데 이는 러시아의 입장에서는 인도와 공동개발하는 Chandrayaan-2 는 Luna-Glob 의 후속 사업이기 때문이다. 실제로 Luna-Resurs 는 Luna-Glob 착륙선과 동일한 구조와 탑재장비로 이루어졌다. 그림 12는 Chandrayaan-2 착륙장치의 구조형상을 보여주는데 Luna-Glob 에 사용된 러시아의 착륙장치 플랫폼임을 알 수 있다. 러시아의 착륙장치가 착륙 시 발생하는 충격을 흡수하는 방식에 대해서는 아직까지 공개된 자료가 없기 때문에 착륙장치에 충격흡수 메커니즘이 구현되었는지의 여부도 확실하게 알 수 없는 상태이다. 표 5는 공개된 Chandrayaan-2 의 질량과 탑재장비 목록을 나타낸다 [24,25]. 착륙선의 가장 중요한 탑재체는 월면차이며 30~100 kg 수준의 질량으로 설계되고 있다.



자료: 참고문헌 [24]

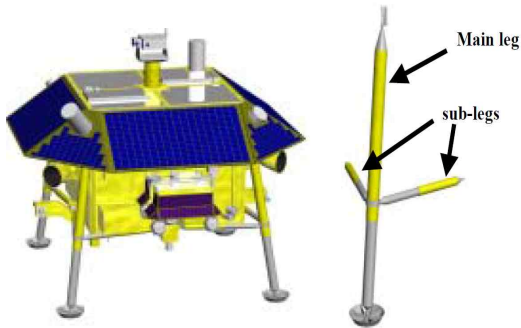
그림 12. Chandrayaan-2 lander (Luna-Resurs)

표 5. Chandrayaan-2 의 질량 및 탑재장비

Chandrayaan-2	Mass (kg)	Payloads
Orbitor	1,400	<ul style="list-style-type: none"> ● X-ray Spectrometer ● Solar X-ray Monitor ● L and S band Synthetic Aperture Radar (SAR) ● Imaging IR Spectrometer ● Neutral Mass Spectrometer ● Terrain Mapping Camera
Lander	1,250	<ul style="list-style-type: none"> ● Rover ● Laser Induced Breakdown Spectroscope ● Alpha Particle Induced X-ray Spectroscope

3.4 SELENE-2

우주강국인 일본은 아직까지 달착륙에 성공한 적이 없으며 달궤도선 SELENE-1 의 성공에 이어 후속 사업인 SELENE-2 에서 고성능 착륙기술 확보를 주목표로 내세우고 있다 [4,26]. SELENE-2 는 고정밀도의 자동 착륙선으로 개발될 예정인데 고성능 센서와 제어기술을 개발하여 장애물을 회피하면서 원하는 지역에 정확히 착륙하는 기술들의 구현을 목표로 하고 있다. 일본 항공우주연구원(JAXA) 에서는 착륙선에 장착된 카메라 영상과 미리 준비된 지형 자료를 비교하는 영상기반 항법기술을 사용할 예정인데, 소행성 탐사선 하야부사에 이미 적용된바 있어 원하는 지점에 정확히 착륙시킬 수 있는 기술을 보유하고 있다 [27,28]. 그림 13 은 SELENE-2 의 구조를 나타내는데 현재까지 진행된 설계 상태에서 착륙장치는 Cantilever 형 트러스로 이루어진 4개의 다리로 구성되어있다. 주지주와 보조지주 모두 내부에 알루미늄 허니콤을 삽입하여 착륙시 허니콤이 압착됨으로 충격에너지가 흡수되도록 하였다. SELENE-2 는 궤도선과 착륙선의 구분이 없이 궤도선이 궤도를 운행하다가 착륙선으로 전환되어 달표면으로 하강하며, 표 6은 SELENE-2 우주선의 질량정보를 나타낸다 [28].



자료: 참고문헌 [28]

그림 13. SELENE-2 lander & leg structure

표 6. SELENE-2 의 질량 정보

SELENE-2	Mass (kg)
Dry mass	520 (including 30kg rover)
Propellant mass	1,480
Total	2,000

4. 결론 및 한국형 달착륙선 개발

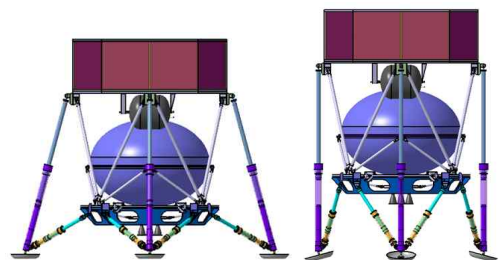
미국과 구소련의 우주개발 경쟁 속에서 막대한 예산과 인력이 투입되었던 달탐사 연구는 60, 70년대가 지난 후 적극적인 활동을 보이지 않다가 21세기 이후 우주강국들에 의해 활발히 재개되고 있다. 현재 달궤 도선은 수차례 발사되어 왔으나 달에 착륙하는 임무를 갖는 착륙선의 발사는 아직 재개되지 못하였다. 본 논문에서는 달착륙선이 달 표면에 안전하게 착륙할 수 있도록 해주는 착륙장치 설계안들을 검토 및 비교하였다. 달착륙선 개발을 재개하는 러시아뿐만 아니라 처음 시도하는 중국, 인도, 일본의 경우 모두 착륙장치 설계기술은 착륙선 개발을 위한 핵심기술로 간주되고 있으며, 착륙장치는 경량화에 유리한 트러스 구조로 설계되고 있다. 착륙시 발생하는 충격을 흡수하기 위해 대부분의 착륙장치는 알루미늄 폼이나 허니콤을 트러스 내부에 삽입하거나 착륙패드 밑면에 부착하여 충격 에너지가 소성변형 에너지로 변환되는 메커니즘을 구현하였다.

현재 한국항공우주연구원에서 수행하고 있는 달탐사선 개발모델 예비설계는 표 7과 같은 설계요구조건을 설정하고 구조설계를 진행하고 있다. 달탐사선은 달까지 향하기위한 추진연료의 중량이 크기 때문에 탐사선 구조체 무게의 2.5배가 넘는 추진연료 무게를 지탱하면서 탑재장비를 발사 및 착륙환경에서 안전하게 보호하기 위해 가벼우면서도 강성 및 강도가 극대화되도록 설계되어야 한다.

표 7. 한국형 달탐사선의 예비설계 요구조건

Classification	Item	Requirement Description
Size	Envelope	• Φ 2.0m x 3.0m
	LV Interface	• 937mm Clamp-band
Mass Prop.	Mass	• Launch Mass: 550kg • Dry Mass: 150kg
	Center of Gravity	• \pm 10mm
Structural Integrity	Stiffness	• 1 st Freq : > 20Hz(Lateral), >35Hz(Longitudinal) • Deployed S/A : > 0.35Hz (TBD)
	Strength	• Quasi Static Load: 3.5g(Lateral), 12g(Longitudinal) • Ground Load: 2g (All Direction) • Sinusoidal: 1.6g(Z), 1.2g(X,Y) • M.S : > 0 @ all Condition • S.F : 1.1 (yield), 1.25(ultimate), 2.0(Composite)
Landing	Stability & Impact Alleviation	• Landing Velocity : H 1m/s, V 4m/s • Obstacle & Slope of Regolith: 10cm(max), 15deg(max) • No Occurrence of Tip-Over @ above Condition • Landing Load: < 10g

그림 14는 현재 개념설계 과정을 마친 한국형 달착륙선의 구조를 보여준다. 4개의 다리가 inverted tripod 형의 트러스 구조로 설계된 전통적인 소형 달착륙선의 구조설계 방식을 취하고 있다. 발사체 내부 공간을 효율적으로 사용하기 위하여 다리는 접힐 수 있는 구조이며, 다리를 구성하는 실린더 내부에는 알루미늄 허니콤을 삽입하여 충격 에너지를 흡수하는 가장 효율적인 방식을 채택하였다.



자료: 항공우주연구원 위성구조팀

그림 14. 한국형 달착륙선 개념설계 결과

참고문헌

1. W.T. Huntress, V.I. Moroz, I.L. Shevaley, "Lunar and Planetary Robotic Exploration Missions in the 20th Century", Space Science Reviews, Vol. 107, 2003, pp. 541-649.
2. List of current and future lunar missions, http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_current_and_future_lunar_missions
3. NASA's lunar and planetary science website, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planets/moonpage.html>
4. T. Okada, S. Sasaki, T. Sugihara, et al., "Lander and rover exploration on the lunar surface: A study for SELENE-B mission", Advances in Space Research, Vol. 37, 2006, pp. 88-92.
5. S. Menon, "India's rise to the Moon", Nature, Vol. 455, 2008, pp. 874-875.
6. NASA's solar system exploration website, <http://solarsystem.nasa.gov/missions/profile.cfm?Sort=Target&Target=Moon&Era=Future>
7. W. F. Rogers, "APOLLO EXPERIENCE REPORT: LUNAR MODULE LANDING GEAR SUBSYSTEM", NASA Technical Note D-6850, 1972.
8. Y. Sun, Y. Hu, R. Liu, Z. Deng, "Touchdown dynamics modeling and simulation of lunar lander", International Symposium on systems and control in aeronautics and astronautics (ISSCAA), 2010, pp. 1320-1324.
9. Y. Takano, Y. Takizawa, S. Sasaki, "The SELENE project and Japanese future lunar exploration", Acta Astronautica, Vol. 57, 2005, pp. 112-115.
10. S.C. Paschall, T. Brady, B.E. Cohanin, R. Sostaric, "A Self Contained Method for Safe & Precise Lunar Landing", IEEE Aerospace Conference, 2008, pp.1-12.
11. C. Jinbao, N. Hong, "Overloading of landing based on the deformation of the lunar lander", Chinese Journal of Aeronautics, Vol. 21, 2008, pp. 43-47.
12. Russian Space Web by Anatoly Zak <http://www.russianspaceweb.com/luna24.html>
13. L.D. Jaffe, et. al. "Surveyor 1 Mission Report Part 2. Scientific Data and Results", NASA, 1966, pp. 69-83.
14. Surveyor homepage in wikipedia http://en.wikipedia.org/wiki/Surveyor_program
15. NASA's Surveyor homepage <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/lunar/surveyor.html>
16. NASA's Apollo-11 lunar module homepage <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1969-059C>
17. Craig Covault, "Russia Plans Ambitious Robotic Lunar Mission", Aviation Week and Space Technology News, June 2006
18. Russian Space Web by Anatoly Zak http://www.russianspaceweb.com/luna_glob.html
19. <http://danielmarin.blogspot.com/2010/10/luna-glob-luna-resurs-y-chandrayaan-2.html>
20. <http://danielmarin.blogspot.com/2010/02/luna-glob-luna-grunt-y-chandrayaan-2.html>
21. S. Clark, "China's second moon probe dispatched from Earth", Spaceflight Now, 1 October 2010. <http://www.spaceflightnow.com/news/n1010/01change2launch/>
22. China Military News <http://www.china-defense-mashup.com/chinas-probe-to-land-on-moons-surface-in-2013.html>

23. China Military News
<http://www.china-defense-mashup.com/china-expects-to-launch-fifth-lunar-probe-change-5-in-2017.html>
24. Russian Space Web by Anatoly Zak
http://www.russianspaceweb.com/luna_resurs.html
25. "Payloads for Chandrayaan-2 Mission Finalised", Indian Space Research Organisation (ISRO)
http://www.isro.gov.in/pressrelease/scripts/pressreleasein.aspx?Aug30_2010
26. JAXA's SELENE-2 website,
<http://www.jspec.jaxa.jp/e/activity/selene2.html>
27. K.Nishiguchi, "Obstacle Detection and avoidance Method to Achieve a Soft Landing on the Moon and Planets," Transactions of the Society of Instruments and Control Engineers Vol.38, 2002, No.4, pp. 1-9.
28. I. Nakatami, K. Matsumoto, T. Izumi, "SELENE-B: Proposed Lunar Mission with Lander and Rover", International conference on artificial intelligence, robotics and automation in space, I-SAIRAS 2003.