달착륙선 지상시험모델의 구조체 개발

손택준*, 나경수**, 임재혁***, 김경원****, 황도순*****

Development of a Structure for Lunar Lander Demonstrator

Taek-Joon Son*, Kyung-Su Na**, Jae Hyuk Lim***, Kyung-Won Kim****, Do-Soon Hwang*****

Abstract

Korean Lunar Explorer is planned to be launched in the 2020s according to national space development strategy. The Lunar Explorer will be developed as two unmanned light weight models: a lunar orbiter and a lunar lander. The Lunar Explorer's structure should be designed to have light weight due to constraints from launcher as well as to provide structural safety against launch load, in-orbit condition and landing condition and to serve accommodation space for mission equipment. Core technology related to structural development of lunar explorer should be developed in advance. Especially, for lunar lander, technology for developing landing gear which enables lander to land safely on lunar surface is required essentially. This paper deals with structural development of lunar lander ground test model including design, manufacturing and test.

초 록

국가우주개발계획에 따라 2020년 이후 한국형 달탐사선이 발사될 예정이다. 달탐사선은 무인 경량화모델로 달궤도선과 달착륙선 2종을 개발할 계획이다. 달탐사선의 구조체는 발사 및 궤도하중, 착륙하중을 견딜 수 있는 구조적 안정성과 탑재장비의 장착공간을 제공할 뿐만 아니라 발사체의 탑재능력을 고려하여 가볍게 설계되어야 한다. 이를 위해 달탐사선 구조체의 개발과 관련된 핵심기술의 선행개발이 요구된다. 특히, 달착륙선의 경우 착륙선이 달 지면에 안전하게 착륙할 수 있게 해주는 착륙장치의 개발기술이 필수적이다. 본 논문에서는 달착륙선 지상시험모델 구조체의 설계, 제작, 시험을 포함한 개발내용을 다룬다.

키워드 : 알루미늄 하니콤 (aluminium honeycomb), 낙하충격시험(drop impact test), 충격흡수체 (impact absorber), 달착륙선 지상시험모델(lunar lander demonstrator), 착륙장치(landing gear), 착륙 안정성(landing stability)

접수일(2013년 4월 3일), 수정일(1차 : 2013년 6월 12일, 2차 : 2013년 6월 15일, 게재확정일 : 2013년 7월 1일)
* 대한항공기술연구원/taekjson@koreanair.com
** 대한항공기술연구원/kyungsna@koreanair.com
*** 한국항공우주연구원 위성구조팀/ljh77@kari.re.kr
**** 한국항공우주연구원 위성구조팀/kwkim74@kari.re.kr
***** 한국항공우주연구원 위성본체실/dshwang@kari.re.kr

1. 서 론

한국형 달탐사선은 달 궤도에서 임무를 수행할 궤도선과 달 표면에 착륙하여 임무를 수행할 착륙선으로 구성되며 국가우주개발계획에 따라 2020년 이후 발사를 목표로 개발될 계획이다[1].

착륙선의 경우, 착륙선이 안전하게 달 표면에 착륙할 수 있도록 착륙시 충격하중을 흡수하고 안정된 자세를 유지할 수 있는 핵심기술의 확보가 필요하다. 2012년 한국항공우주연구원이 개발 및 시험을 완료한 달착륙선 지상시험모델(Lunar Lander Demonstrator)은 달착륙선의 개발에 필요한 선행 핵심기술의 획득을 목적으로 개발되었다. 지상시험모델을 통해 관련 선행기술을 개발하고 지구환경에서 이착륙시험을 수행하게 된다.

지상시험모델의 구조체는 시스템 요구조건을 토대로 운용하중에 견디고 착륙 안정성을 제공할 수 있어야 하며 임무장비를 탑재할 수 있는 인터페이스를 제공해야 한다. 또한 이륙중량의 제한으로 시스템의 요구중량에 맞도록 가볍게 설계되어야 한다. 구조체는 본체와 착륙장치로 구성되며 필요한 강도와 경량화를 위해 본체에는 탄소섬유 복합재 스킨과 알루미늄 하니콤 코아를 적용한 패널과 트러스 구조를 적용하였다.

착륙장치는 충격흡수에 용이한 메커니즘을 갖는 구조와 충격흡수체를 적용하였다. 충격흡수체로 소성변형이 가능한 알루미늄 하니콤을 사용하였다. 알루미늄 하니콤을 사용한 충격흡수장치는 우주환경에 적합하고 충격흡수 성능이 우수하여 아폴로를 비롯한 국외 타 탐사선의 충격흡수체로 사용되었다[2].

구조체의 요구 성능 충족을 위해 구조해석과 착륙 동적해석을 수행하였으며 착륙장치의 개발시험을 통해 검증하였다. 본 논문에서 지상시험모델 구조체 개발을 위해 수행된 설계, 제작 및 시험에 대한 결과를 기술하였다.

2. 본 론

2.1 구조체 설계

2.1.1 설계개요 및 요구조건

달착륙선은 탑재할 발사체의 제한조건에 따라 발사중량 550kg으로 설계되며 달착륙선의 지상시험모델은 그림 1과 같이 착륙선의 기본 형상을 기준으로 시스템 운용조건에 따라 100kg 내외로 설계된다. 이중 구조체는 탑재장비와 연료를 제외한 45kg이하로 설계되었으며 운용 조건에 따라 구조체의 경량화와 탑재장비의 인터페이스를 변경하여 설계를 수행하였다. 또한 구조체는 요구 하중 및 착륙조건에서 필요 강도와 착륙 안정성을 갖도록 설계되었다.

지상시험모델 구조체의 형상은 그림 2와 같으며 탑재장비와 연료탱크를 장착하기 위한 본체(Bus Structure)와 착륙시의 착륙중량을 지지하고 착륙안정성을 제공하기 위한 착륙장치(Landing Gear) 4조로 구성된다. 구조체의 크기는 1.7m(높이) x 2.3m(폭)으로 설계되었다. 구조체의 주요 설계 요구조건은 표 1과 같다[3].

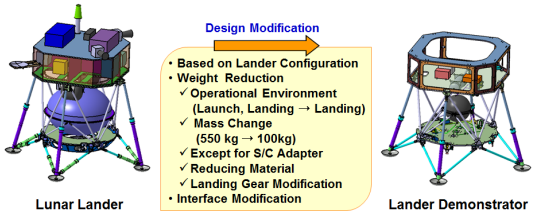

그림 1. 달착륙선 지상시험모델 설계개념

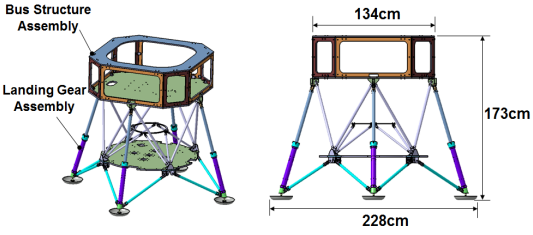

그림 2. 달착륙선 지상시험모델 구조체 설계형상

표 1. 달착륙선 지상시험모델 구조체의 설계 요구조건

Item	Requirement
Mass	≤ 45kg
Strength	• Quasi Static Load - Bus Structure: ±5g(Axial), ±2g(Lateral) - Landing Gear:(1 Leg Touch-down) ±10kN(Axial), ±2kN(Lateral) • Margin of Safety >0
Landing	• Landing Mass: 75kg • Landing Velocity - Horizontal 1m/sec(max), - Vertical 3m/sec(max) • Ground Condition - Bearing Strength: Similar to Lunar Surface(10kPa/cm avg.) - Slope : 5deg(Max) • No Tip Over

2.1.2 본체 설계

구조체의 본체는 탑재장비를 위한 탑재 구조체와 추진모듈을 장착하기 위한 추진 구조체로 구성된다. 본체 구조물의 경우, 운용조건에서의 필요 강도조건 충족과 경량화를 위해 탄소섬유 복합재(M55J/#3800 CFRP) 스킨과 알루미늄 하니콤 코아로 구성된 패널 및 플랫폼을 적용하였으며 알루미늄 합금 2024-T3 튜브가 사용된 트러스 구조를 적용하였다. 또한 경량화 관점에서 강도가 요구되지 않는 부분은 제거하고 체결부위에 최소 수량의 클릿(Cleat)과 피팅(Fitting)을 적용함으로써 조립을 단순화하도록 설계하였다.

2.1.3 착륙장치 설계

2.1.3.1 개요 및 구성

착륙선은 지면으로부터 일정 높이에 도달했을 때 일정 수평속도와 수직속도로 자유 낙하하여 지면에 착륙하게 된다. 착륙장치는 이때 발생하는 충격에너지를 흡수하여 본체 및 탑재장비에 전달되는 하중을 효과적으로 감쇠시키고 착륙선이 전복되지 않도록 착륙 안정성을 제공해야 한다. 또한 착륙중량을 포함한 착륙하중에 견딜 수 있는 강도가 요구된다.

착륙장치는 착륙해석을 통해 착륙 안정성을 갖도록 4조로 구성하고 착륙장치의 폭과 형상을 결정하였다. 각 착륙장치는 그림 3과 같이 착륙중량을 지지하고 충격하중을 흡수할 수 있는 주 스트럿, 지지 구조인 보조 스트럿, 지면과의 접지를 위한 풋패드 및 연결 피팅으로 구성된다.

주 스트럿에는 충격흡수체인 알루미늄 하니콤을 장착하여 하니콤의 압축강도(Crush Strength)를 초과한 하중 발생시 하니콤이 압축되면서 충격에너지를 흡수할 수 있도록 설계되었다. 또한 마찰을 최소화하여 압축하중이 하니콤에 효과적으로 전달할 수 있도록 베어링을 설계하였으며 그림 4와 같이 필요한 자유도를 갖도록 각 연결 조인트를 구성하여 작동 메커니즘을 만족하도록 설계하였다.

2.1.3.2 충격흡수체 설계

우주용 충격흡수체로 소성변형에 의해 충격에너지를 흡수하는 알루미늄 하니콤을 사용한다. 하니콤은 가볍고 충격흡수율이 높으며 착륙장치

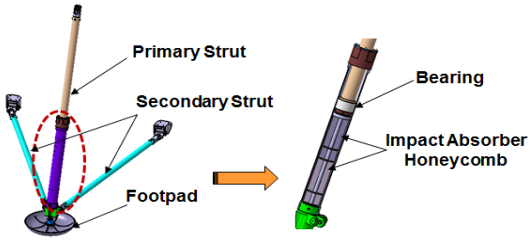

그림 3. 착륙장치 설계

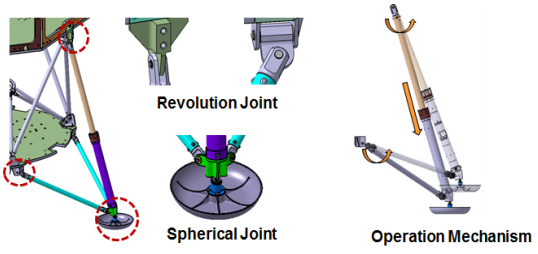

그림 4. 조인트 및 메커니즘 설계

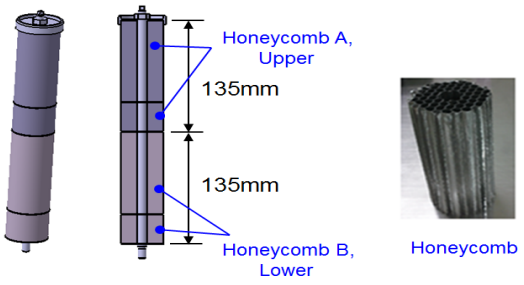

그림 5. 충격흡수체 설계

표 2. 충격흡수체 사양

Honeycomb	Area	Crush Strength
A	1440mm^2	0.90MPa
B	1440mm^2	1.79MPa

에 적용하기에 구조가 간단하여 일회성 착륙에 적합하다[2]. 충격흡수체 하니콤의 설계는 착륙조건에서 충격에너지를 요구 수준으로 흡수할 수 있도록 하니콤의 용량을 결정하는 것이다. 지상시험모델 착륙장치 하니콤의 설계형상을 그림 5와 표 2에 나타내었다. 지상시험모델의 경우 착륙장치 1개가 모든 착륙하중을 지지하는 최악의 조건(One Leg Touch-down)을 고려하고 충격을 흡수한 후 본체로 전달되는 하중이 5g이하가 되도록 하니콤의 길이, 압축강도 및 단면적을 결정하였다. 또한 여러 경우의 착륙조건에서 효율적으로 충격흡수가 가능하고 하니콤의 크기를 최적화하기 위해 하니콤의 강도를 두가지로 선정해 조합하였다. 이로 인해 충격에너지가 작은 경우 압축강도가 낮은 하니콤이 흡수하고 그 이상의 에너지 흡수가 필요할 경우 압축강도가 높은 하니콤이 충격을 흡수할 수 있다.

2.2 강도해석

설계된 구조물의 구조 안정성 검증을 위해, 상용 프로그램인 MSC PATRAN/NASTRAN을 사용하여 유한요소 모델링 및 강도해석을 수행하였다. 3-D CATIA 모델을 기반으로 작성된 본체 및 착륙장치의 유한요소모델은 그림 6과 같다.

표 1에 기술된 하중조건 하에서 강도해석을

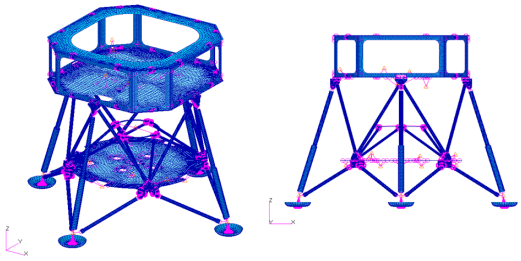

그림 6. 달착륙선 지상시험모델 구조체 유한요소모델

표 3. 구조체의 최소 안전여유율

조립품	부품	최소 안전율	파손모드
본체	금속 부품	0.64	최대 주응력
	패널/플랫폼	0.46	부싱 풀아웃
	체결부	0.63	볼트 파손
착륙 장치	금속 부품	0.03	항복
	체결부	0.23	핀 파손

수행한 결과, 모든 구조물의 최소 안전율이 0 이상으로 요구조건을 충족함을 확인하였으며 본체 및 착륙장치의 최소 안전율은 표 3에 정리하였다.

2.3 착륙해석

설계된 지상시험모델 착륙장치의 충격흡수성과 착륙 안정성을 검토하기위해 착륙 동적해석을 수행하였다. 다물체 동역학 해석용 프로그램인 MSC ADAMS를 사용해 해석을 수행하였으며 해석을 위한 모델은 설계모델로부터 무게중심, 질량 특성을 부여하고 연결 조인트에 구속조건을 적용하였다. 충격흡수체는 그림 7과 같이 하니콤의 압축특성곡선을 갖는 댐퍼로 모델링하였으며, 착륙지면과의 접촉조건은 스프링상수(160N/mm)와 댐퍼계수(스프링상수의 5%)를 적용하고 정지마찰계수 0.85, 동마찰 계수 0.3을 적용하였다. 해석은 착륙시 체계 요구조건인 지면 경사 0°, 5°에서 최대 속도인 3m/sec(수직), 1m/sec(수평) 조건을 적용해 수행하였으며 주요 착륙조건은 그림 8과 같다. 착륙해석을 수행한 결과 그림 9와 같이 Case 4 (지면 경사 5°, 최대속도 3m/sec(수직), 1m/sec(수평))에서 최대 충격하중 약 7kN,

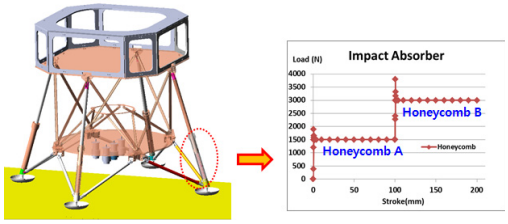

그림 7. 착륙해석 모델

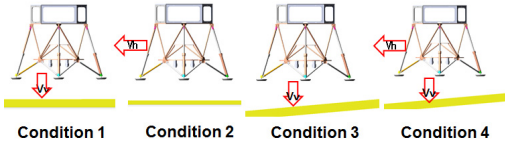

그림 8. 착륙해석 조건

하니콤의 최대 스트로크 110mm가 발생되었으며 충격흡수 후 본체로 전달되는 하중은 3g이하로 요구조건(≤5g)을 만족하는 것으로 분석되었다[4]. 또한 최대 20°까지 착륙 안정성에 문제가 없음을 확인하였다.

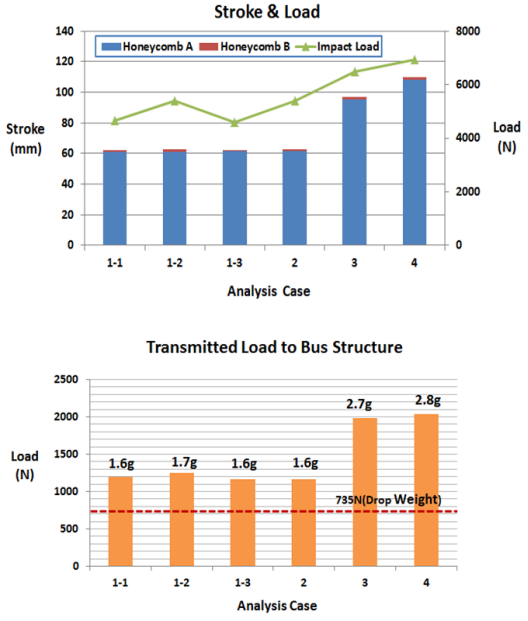

그림 9. 착륙해석 결과

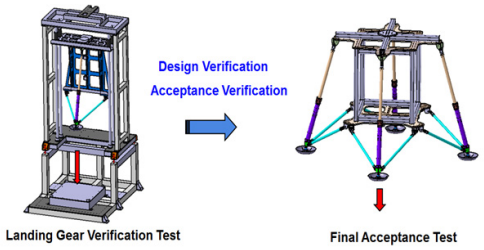

그림 10. 착륙장치 개발시험 개념

표 4. 착륙장치 시험조건

항목	요구조건	시험조건
착륙중량	75kg	> 75kg
착륙속도	≤3m/sec (수직) ≤1m/sec (수평)	≤3m/sec (수직) (낙하높이: 46cm)
지면조건	• 지지강도 0.5~100kPa/cm (평균 10kPa/cm) • 경사도: ≤5°	• 지지강도: 단단한 면(금속) 유연한 면(토양) (5 ~ 20kPa/cm)* • 경사도: 0°, 5°

* 토양경도계로 측정

2.4 착륙장치 개발시험

2.4.1 개요 및 시험조건

착륙장치의 설계검증을 위해 개발시험을 그림 10과 같이 수행하였다. 착륙장치 시험모델 1조를 제작해 착륙장치의 설계 및 제작검증을 위한 시험을 수행하였으며, 이후 지상시험모델 본체에 장착되는 착륙장치 개발모델 4조를 제작하고 수락시험을 수행하였다. 착륙장치의 시험은 표 4의 조건으로 수행되었다. 착륙장치 1개가 착륙중량 전부를 지지하는 최악의 조건을 고려하고 지면은 단단한 면과 달 지면과 유사한 토양조건에서 시험을 수행하였다.

2.4.2 착륙장치 검증시험

2.4.2.1 시험방법

착륙장치 검증시험의 목적은 착륙장치의 구조적 안정성, 작동 기능성, 충격흡수성에 대한 설계

표 5. 착륙장치 검증시험 방법

항목	시험방법
(a) 하니콤 압축시험	준정적 하중(100mm/min) 하중-변위 측정
(b) 하니콤 낙하충격 시험	착륙속도 변화(최대 3m/sec) 0° 단단한 지면 충격흡수 기능 확인 충격하중, 하니콤 스트로크 측정
(c) 주 스트럿 낙하충격 시험	착륙속도 변화(최대 3m/sec) 0° 단단한 지면 충격흡수 기능, 구조 안정성 확인 충격하중, 하니콤 스트로크 측정
(d) 착륙장치 낙하충격 시험	착륙속도 변화(최대 3m/sec) 0°, 5° 단단한 지면, 토양 지면 충격흡수 기능, 구조 안정성 확인 충격하중, 하니콤 스트로크 측정

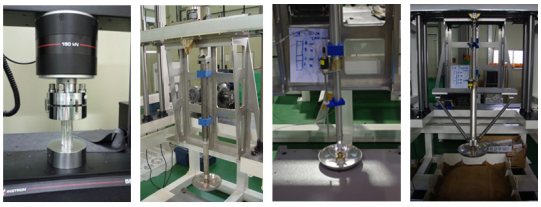

그림 11. 착륙장치 검증시험

의 적정성을 확인하는 것이다. 이를 위해 표 5에 기술된 시험방법에 따라 (a)하니콤 단품 압축시험 (b)하니콤 단품 낙하충격시험→(c)주 스트럿 시험→(d)착륙장치 시험의 단계로 검증시험을 수행하였다. 시험형상은 그림 11에 나타내었다.

2.4.2.2 시험결과

시험결과, 충격흡수에 따른 하니콤의 최대 변형 스트로크는 표 6과 같이 발생하여 하니콤 설계의 적정성을 확인하였다. 스트로크는 하니콤 단품상태의 시험보다 착륙장치 조립체로 시험시 더 적게 발생하였는데 이는 착륙장치 조립체에서 구조 연결부 운동에 따른 마찰손실과 스트럿 구조체로 충격하중 일부가 전파된 영향으로 판단된다. 최대 충격하중은 단단한 지면 조건(약 10kN)

표 6. 하니콤 충격흡수성
(낙하조건: 3m/sec, 0° 단단한 지면)

시험	하니콤 최대 변형 스트로크 (하니콤 길이: 270mm)
하니콤 낙하시험	222mm(원래 길이의 82%)
주 스트럿 낙하시험	196mm(원래 길이의 72%)
착륙장치 낙하시험	174mm(원래 길이의 64%)

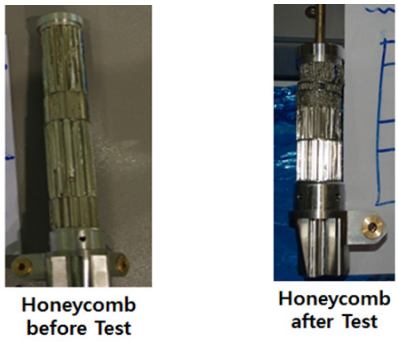

그림 12. 착륙장치 검증시험 전후 충격흡수체 형상

보다는 유연한 토양조건(3kN 내외)에서 적게 발생함으로써 토양조건이 구조적으로 안정된 착륙에 유리함을 확인할 수 있었다[5]. 그림 12는 낙하충격시험으로 소성 변형된 하니콤의 형상을 보여준다.

시험결과를 종합하면 구조물의 손상, 영구변형, 체결부의 이탈 등 구조 결함이 발생하지 않았고 착륙장치가 설계된 메커니즘에 따라 작동함으로써 하니콤에 압축하중의 전달이 용이하여 충격흡수가 양호함을 확인하였다. 또한 충격흡수로 인한 하니콤의 스트로크는 하니콤의 설계용량을 충족하였다.

2.4.3 착륙장치 수락시험

착륙장치 검증시험을 통해 확인된 설계를 토대로 지상시험모델에 장착될 착륙장치 개발모델 4조를 제작하고 지상시험모델 본체의 장착인터페이스와 동일한 더미 구조체를 제작하여 시험 장

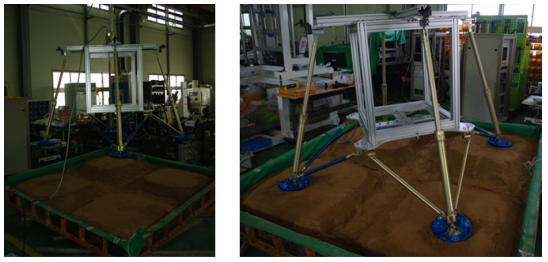

그림 13. 착륙장치 수락시험

표 7. 하니콤 충격흡수성
(낙하조건: 3m/sec, 5° 토양 지면)

착륙장치	하니콤 최대 변형 스트로크	토양 침투깊이
#1	28mm	33mm
#2	30mm	27mm
#3	32mm	37mm
#4	26mm	34mm

치를 구성하였다. 시험은 그림 13과 같이 낙하중량 75kg이상으로 낙하높이 46cm(최대 수직속도 3m/sec)에서 수행하였다. 지면은 달 토양과 유사한 지지강도 5.16 kPa/cm 경사도 0°, 5° 조건을 사용하였다[5].

시험결과 토양과 하니콤에서 충격흡수를 하였으며 안정된 착륙자세를 유지함을 확인하였다. 표 7은 착륙장치 1개가 지면에 먼저 착지하게 하는 조건에서 낙하시험을 수행한 결과를 나타낸다. 충격흡수 후 측정된 하니콤의 스트로크와 토양 침투깊이는 착륙장치 4개에서 유사하게 발생하였다. 이를 통해 실제로는 착륙장치 4개가 지면에 거의 동시에 착지하므로 착륙장치 1개가 충격하중을 다 받지 않고 착륙장치 4개에서 충격을 분산하여 흡수함을 확인할 수 있었다.

2.5 지상시험모델 구조체 제작

앞서 기술한 해석, 시험을 통해 검증된 설계형상을 기반으로 그림 14와 같이 지상시험모델 구조체의 본체와 착륙장치를 제작하였다. 본체는

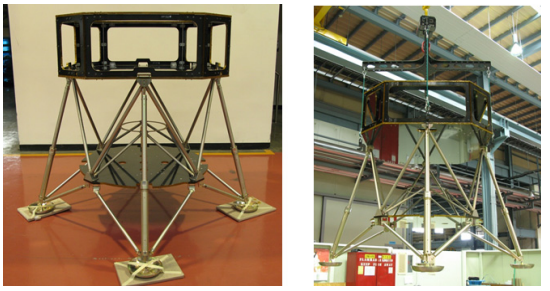

그림 14. 달착륙선 구조체 제작형상

탄소섬유 복합재 면재와 알루미늄 하니콤 코아를 적용한 패널/플랫폼과 알루미늄 합금으로 제작되었으며 착륙장치는 알루미늄 합금으로 제작되었다. 최종조립 후 중량을 측정한 결과, 43.87kg로 요구중량 (≤45kg)을 충족함을 확인하였다.

3. 결 론

한국형 달탐사선 선행기술 개발의 일환으로 수행된 달착륙선 지상시험모델 구조체에 대한 설계, 해석, 시험 및 제작결과를 기술하였다. 본 개발을 통해 확보된 선행기술은 향후 한국형 달탐사선을 개발하는데 중요한 기반기술이 될 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 교육과학기술부, “제2차 우주개발진흥기본계획”, 2011.12
2. William F. Rogers, "Apollo Experience Report- Lunar Module Landing Gear Subsystem", NASA TN D-6850, 1972.
3. Gwanghyeok JU, et al, “Korean Lunar Lander Demonstrator Development”, 52nd International Astronautical Congress, 2011, IAC-11-D9.2.8, pp. 1~8.
4. 손택준, 나경수, 강연식, 임재혁, 황도순, “달착륙선 지상모델의 착륙장치 설계를 위한 동적거동에 관한 연구”, 춘계 소음진동학회 학술대회 논문집, 2012, pp.519~520.

5. 임재혁, 김경원, 전종협, 손택준, 이문석, 김성훈, 황도순, “한국형 달탐사선 지상시험모델 착륙장치 낙하시험결과 분석”, 추계 한국항공우주학회 학술대회 논문집, 2012, pp.179~183.