

우주태양광 비행선의 기술 동향

윤용식*, 최정수**, 김형완***

Technological Trends in Space Solar Sails

Yoon, Yong-Sik*, Choi, Jung-Su**, Kim, Hyung-Wan***

ABSTRACT

Space solar sails are a form of spacecraft propulsion using the radiation pressure of light from a star or laser to push enormous ultra-thin mirrors to high speeds. With respect to it, U.S.A, Japan, E.U. and Russia, etc. have performed a substantial research and the space flight test. On May 2010, JAXA succeeded in launching the world's first interplanetary solar sail spacecraft "IKAROS" to Venus. Currently, solar sail propulsion is aimed chiefly at accomplishing a number of non-crewed missions in any part of the solar system and beyond. This paper presents the technology trend of advanced countries on the development of the solar sails as a new propulsion method for the space investigation and travel.

초 록

우주태양광 비행은 별이나 레이저에서 나오는 빛의 복사 압력을 이용하여 아주 얇은 물질을 매우 빠른 속도가 되도록 하는 위성체 추진을 위한 방법 중 하나이다. 이에 관한 연구는 미국, 일본, E.U. 그리고 러시아 등에서 기초 연구를 비롯한 우주 비행 시험을 수행하고 있다. 2010년 5월 일본의 JAXA는 세계 최초로 태양광 돛을 가진 행성간 위성체인 "IKAROS"를 금성까지 발사하는데 성공한 바 있다. 현재 태양광 추진 방법으로 태양계를 포함한 은하계에 많은 무인 우주 비행 임무를 수행하고자하는 목표를 가지고 있다. 본 논문에서는 우주 탐사 및 여행을 위한 새로운 추진 방법으로 우주 선진국들의 우주태양광 비행선의 기술 동향에 대해 기술하였다.

Key Words : Space Solar Sails, Satellite, Sail materials, Solar sail deployment tests, SpacePropulsion system, Solar sail propulsion system

* 윤용식, 한국항공우주연구원 위성시험실 우주환경시험팀
ysyoon@kari.re.kr

** 최정수, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
jschoi@kari.re.kr

*** 김형완, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
khw@kari.re.kr

1. 서론

1960년에 발간된 공상과학 소설 중 C. 스미스(Cordwainer Smith)에 의한 “영혼을 항해한 여인(The lady who sailed the soul)”이라는 소설이 우주 태양광 범선에 관한 최초의 작품이다. 이후로 태양광 돛(혹은 비행선)에 의해 우주여행을 하는 문학 작품들이 연이어 발간되었다. 그리고 1990년대에 들어 컴퓨터 그래픽 기술의 발달로 우주 태양광으로 추진되는 많은 영상 작품들이 발표되고 있다. 그 대표적인 것이 1995년에 방송된 ‘스타 트랙-Deep Space Nine’에서 ‘우주태양광 우주선’이 상영되었고, 2002년에 상영된 ‘스타워즈 에피소드 2 - 클론의 습격’에서 우주를 넘나드는 추진 장치로 우주 태양광을 이용하는 것을 보여 주었다.

이와 같이 공상 과학 소설이나 영상 작품에서 나타나고 있는 우주 태양광 비행 기술은 현재 우주 과학자들에 의해 새로운 우주 추진의 방법 중 하나로 연구·개발되고 있다. 우주 태양광 돛에 의해 추진되는 우주 비행체를 개발하려는 목적은 우주 비행체에 필수적이지만 폭발 위험성이 많고, 장거리 우주 비행에 따라 자체 무게도 큰 추진 시스템에 대하여 우주 태양광 돛을 사용함으로써 우주 비행체의 무게를 줄일 수 있고, 우주에서 매우 빠른 속도로 비행이 가능하다는 데 있다. 예를 들어 현재 운용되고 있는 보이저 1호(Voyager 1)의 경우 4.7404 km/s의 최대 속도를 나타내는데, 우주 태양광 돛을 사용하는 경우 17 km/s - 32 km/s 혹은 그 이상의 속도를 얻을 수 있을 것으로 예측하고 있다. 특히 2010년 5월 21일 일본 JAXA에서는 우주 태양광 돛을 주 추진 시스템으로 하는 IKAROS (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun)를 세계 최초로 발사에 성공하고 우주에서 태양광 돛의 전개를 성공적으로 수행하여 세계의 주목을 받고 있다.

본 논문에서는 우주 태양광 우주선의 기술적 배경과 특징 그리고 우주 선진국의 개발 동향 등에 대하여 기술하였고, 향후 국내의 개발 방향 등에 대하여 기술하였다.

2. 우주태양광 비행선의 특징

2.1 정의 및 기술적 배경

태양광 비행선(Solar Sails)은 광 비행선(Light Sails) 혹은 광자 비행선(Photon Sails)이라고도 부른다. 태양광 비행선은 별 혹은 레이저로부터 나오는 빛의 복사 압력을 사용하여 아주 얇은 거울을 매우 빠른 속도로 끌어 올리도록 하는 우주선 추진의 한 형태이다[1].

1924년 러시아의 우주 엔지니어인 Friedrich Zander는 빛이 아주 작은 량의 추진력을 제공함으로써 이 효과를 이용하여 연료가 필요 없는 우주 추진의 한 형태로 사용될 수 있을 것이라고 제안 한 바 있다. 또한 이것은 시간이 갈수록 가속도가 붙어 상당한 속도를 얻을 수 있게 된다. 이러한 제안은 $E=pc$ 인 아인슈타인의 관계식에 따라 광자 p 는 운동량이므로 표면으로부터 반사되는 빛은 작은 량의 복사 압력을 가하게 된다는 것으로 확인되었다[2].

우주 태양광 비행선의 경로를 변경하기 위해서는 두 가지 방법이 있다. 첫 번째로 별이나 행성과 같은 질량체 부근의 중력으로 비행선의 방향을 바꿀 수 있다. 두 번째로 광원(light source) 방향으로 비행선의 방향을 기울일 수 있다. 이것은 비행선의 돛 평면에 작용하는 힘이 그 표면에 수직 각이 되도록 함으로써 가속도 방향을 변경할 수 있는 것이다. 그리고 더 작은 보조 날개(vanes)로 항해의 새로운 방향으로 천천히 밀어 주는 데 사용될 수 있다.

2.2 비행 모드

가. 행성 궤도의 이탈

태양광 비행선의 위성체는 행성 궤도를 선회할 필요가 없기 때문에 행성을 이탈하면 태양 방향이나 아니면 그 반대 방향으로 이동한다. 대부분의 태양광 비행선의 우주 비행 임무(mission)는 행성이나 태양으로부터 직접 벗어나는 것보다는 비행선의 궤도를 변경하는데 사용된다. 비행선이 행성 주위의 궤도를 선회하는 것처럼 추진체는 위쪽 궤도로 이동하는 궤도 운동 방향이나 아래쪽 궤도로 이동하는 궤도 운동 방향에 대하여 우주 태양광 비행선의 위성체가 천천

히 돌게 된다. 태양광 비행선이 행성 궤도로부터 충분히 멀리 떨어지게 되면 태양광 비행선은 태양 주위 궤도에서와 유사하게 움직이게 된다.

나. 광선 추진

성간 비행체인 태양광 비행선의 이론적인 연구에 있어서 태양광 비행선이 매우 긴 레이저 광선 동력을 장착하여 추진 방향 임펄스 광선으로 항해를 하도록 계획을 수립한다. 이에 따라 추진 벡터(공간 벡터)는 태양과는 멀어지면서 최종 목표를 향하도록 한다.

이론적으로 지구로부터의 레이저나 다른 광선에 의해 유도되는 광 비행선은 항해 부분을 분리함으로써 그리고 항해의 나머지 전방 접촉면에 광선을 집중함으로써 먼 거리의 별이나 행성으로 접근하는 위성체를 감속시키는데 사용될 수 있다. 그러나 실제로 대부분의 감속은 두 부분이 각각 너무 긴 거리에 있어 초점을 맞추기 위해 분리된 부분을 정확한 광학 형태와 방향이 되도록 해야만 한다.

2.3 태양광 비행선의 한계

태양광 비행선은 약 800km 아래 지구 저궤도에서는 침식이나 공기 저항에 의해 잘 작용하지 않는다. 그리고 800 km 이상 궤도로 몇 달에 걸쳐 우주 비행을 하여 유용한 속도까지 도달하여 매우 작은 가속도를 낼 수 있다. 태양광 비행선은 물리적으로 돛의 길이는 길지만 탑재체 크기는 작다. 또한 태양광 비행선의 우주에서의 돛 전개(deploying)는 매우 도전적이고 어려운 작업이다[3].

태양광 비행선이 감속하기 위해서는 태양과 마주 보아야 한다. 이를 위하여 태양에서 멀리 떨어진 우주 비행에서 행성 외곽 뒤편에 위치하여 태양광으로 감속하여야 한다.

태양광 비행선이 광원인 태양 쪽으로 갈 수 없을 것이라는 것은 잘못된 생각이다. 특히, 태양광 비행선은 궤도 운동에 반대 방향으로 추진됨으로 태양 방향으로 갈 수 있다. 그러나 이러한 비행은 비행선이 태양 쪽으로 나선(spiral) 비행하는 고유의 궤도에 에너지를 감소시키게 된다.

3. 우주태양광 비행선의 개발 현황

우주 태양광 비행선은 대부분 돛이나 연(kite)의 형태로 개발되고 있다. 낙하산은 매우 낮은 질량체이지만 낙하산 천에 작용하는 힘으로 지탱되는 원리를 이용하는 것이다. 우주 태양광 비행선에 작용하는 태양광 복사 압력을 이용하기 위해 비행선의 재질과 형태에 따른 연구·개발이 활발히 진행되고 있다.

3.1 비행선 재질 개발 현황

가. 필름 재질

현재 우주 태양광 비행선을 설계하는데 있어서 가장 공통적인 재질은 2 μm 크기의 알루미늄 캡톤(kapton) 필름이다. 이것은 태양에 근접 비행이 가능하도록 열에도 강하고, 적절하게 강도를 유지한다. 일반적으로 알루미늄 반사 필름은 태양 면에 위치한다. 코스모스 I에 사용된 비행선은 알루미늄으로 된 PET 필름(mylar)으로 제작되었다.

나. 탄소 섬유 재질

2000년 미국 에너지 과학 연구소(Energy Science Laboratories)는 태양광 비행을 위해 유용한 새로운 탄소 섬유 소재를 개발하였다. 이 재질은 종래의 태양광 비행선보다 200 배 이상 두껍지만, 똑같은 질량을 가질 수 있도록 구멍이 매우 많이 나 있다. 이 재질의 강도와 내구성으로 플라스틱 필름보다 매우 튼튼한 태양광 비행선을 만들 수 있다. 이 재질은 자체 전개(self-deploy)가 가능하고, 필름 재질보다 더 높은 온도에서도 견딜 수 있다.

이것은 나노 튜브 메쉬 직조(nano tube mesh weaves) 기술을 기반으로 강한 극광(hyperlight)의 재질을 만들기 위해 분자 제조 기술을 이용하였다. 이 재질을 이용하면 현재 비행선 재질보다 더 가벼운 0.1 g/m² 이하로 만들 수 있다. 즉 5 μm 두께의 PET 필름 재질의 비행선은 7 g/m², 알루미늄 도금된 캡톤 필름의 비행선은 12 g/m² 이지만 탄소 섬유 소재는 3 g/m²가 된다. 그러나 탄소 섬유 재질은 지금까지 단지 실험실 조건에서 생산되고 있고, 산업적 규모로 제조하기 위한 수단이 아직까지 구축되고 있지 않다.

다. 알루미늄 계열 재질

1998-9년에 NASA의 지원을 받은 조프리 란디스 박사는 마이크로파에 의해 추진되는 태양광 비행선(lightsails)을 위해 레이저 광 우주 비행과 탄소 섬유를 위한 알루미늄(alumina)와 같은 재질이 이전의 기본 알루미늄 혹은 캡톤 필름 보다 비행선의 재질로 뛰어나다는 것을 발표한 바 있다[4].

현재까지 알려진 가장 높은 질량대비 추력 설계는 2007년 에릭 드렉슬러(Eric Drexler)에 의해 개발된 대부분의 빛의 파장에 절반이하의 구멍을 갖는 알루미늄의 얇은 그물 모양의 재질이다. 그는 장력 구조로만 지지되는 나노 단위 30 - 100 nm 두께의 알루미늄 필름의 반사판으로 열에너지를 적외선으로 방출하도록 하는 태양광 비행선을 설계하였다. 그러나 실험실에서 필름 샘플을 제작하였지만, 그 재질이 너무 다루기 힘들어 접거나 전개할 수 없었다. 그래서 그것을 전개할 수 있는 장력 구조의 우주용 필름판을 설계하였다. 이 정도 수준의 비행선은 단위 질량당 면적과 전개 가능한 플라스틱 필름에 기초한 설계 보다 “약 50배 더 높은” 가속도를 얻는 것이 가능하게 할 것으로 예상하고 있다.

을 갖춘 그림 2와 같은 사각 형태의 돛 모양이다. 보통 돛의 모서리에 4개의 돛대가 있고, 당김 줄을 잡아주는 하나의 중심 돛대가 있다. 이것의 가장 큰 장점 중 하나는 주름지거나 처지지 않도록 하는 삭구(索具)장치에 위험 지점(hot spots)이 없고, 돛이 태양으로부터 구조물을 보호하도록 하는 것이다. 그러므로 이러한 형태를 갖춘 비행선은 최대한의 추력이 존재하는 태양에 매우 가까이 접근할 수 있도록 한다. 이러한 비행선의 조정은 익형(spars) 끝에 달린 작은 돛을 사용하여 수행 된다.

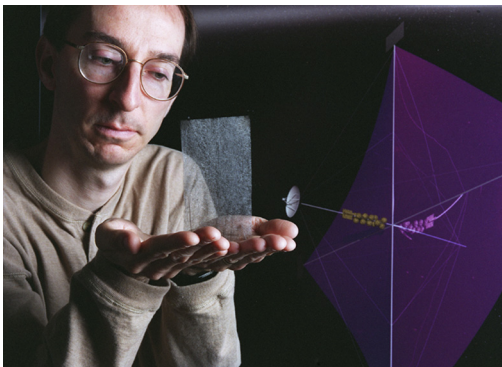


그림 1. 드렉슬러의 알루미늄 필름

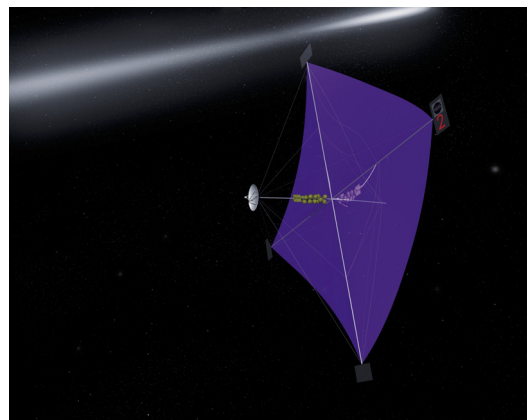


그림 2. NASA의 폭 500 m의 태양광 비행선 개념도

3.2 비행선 개발 현황

가. 태양광 비행선의 일반 구조

지상에서 조립되는 전개 가능한 구조물에 대한 질량 설계 대비 가장 높은 추력을 갖는 비행선은 태양 광이 비치지 않는 어두운 면(暗面)에 돛대와 당김 줄

나. 회전형 비행체의 개발

1970년대 미국 NASA의 제트추진 연구소(이하 JPL)는 헬리 혜성과 랑데부하기 위한 우주 비행 계획을 위해 회전 판(rotating blade) 및 회전 링(rotating ring) 형태의 태양광 비행선에 대한 광범위한 연구를 수행한 바 있다. 이 연구의 목적은 구조적으로 각 운동량에 견고하고, 지지대 제거 및 질량 절감 등이었다. 또한 모든 경우에 있어서, 놀랄만한 장력(tensile strength)으로 동적 하중을 견뎌야 할 필요가 있었다. 이러한 요구 조건을 만족하지 못하는 경우에는 우주 비행선의 고도가 바뀔 때 진동이 발생하고, 그 진동은 구조적 실패의 요인이 될 수 있기 때문이다[5].

또한 JPL은 헬리자이로(heliogyro)라고 하는 태양광 비행선을 설계하였는데, 롤러로 전개되는 플라스틱 필름 날개(blades)를 갖고, 전개 후 회전하면서

원심력을 유지하는 것이다.

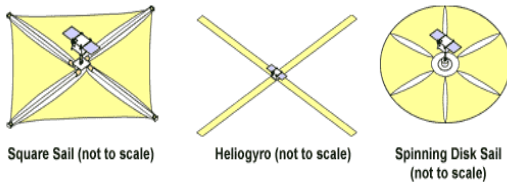


그림 3. 회전형 비행체의 종류

비행선에 탑재된 위성체의 자세와 방향은 헬리콥터의 사이클릭 피치 조정이나 콜렉티브 피치 조정과 같은 방법으로 날개의 각도를 변경함으로써 완벽하게 조정된다. 사각 돛 형태의 비행선에 버금가는 질량 감소 등의 장점은 없지만 비행선을 전개하는 방법이 지지대를 기초로 하는 것 보다 더 단순한 장점이 있다.

그리고 JPL은 회전하는 위성체의 가장자리에 판넬을 붙인 반지 돛(ring sails) 형태의 비행선을 연구하였다. 그 판넬에 전체 면적의 약 1 - 5% 규모의 틈을 만들어 연결선으로 하나의 돛 끝에 다른 돛 끝을 연결하였다. 이들 연결 선 중간의 질량체로 복사 압력으로 조타를 조정하도록 하여 비행선을 팽팽하게 당기게 하였다. JPL 연구자들은 이러한 형태의 비행선이 매우 효과적인 유인 우주선의 구조체가 될 것이라고 언급한 바 있고 특히, 내부 링은 화성 표면의 중력과 거의 같은 인공 중력을 갖게 될 것으로 예상한 바 있다.

다. 전기 태양풍 비행

핀란드 기후 연구소(Finnish Meteorological Institute)의 페카 잔후넨(Pekka Janhunen)은 2006년에 전기 태양풍 비행(electric solar wind sail)이라고 부르는 일종의 태양광 비행을 제안하였다. 전기 태양풍 비행은 기계적으로 일반적인 우주 태양광 비행의 개념과는 공통점이 거의 없다. 전기 태양풍 비행은 위성체에 탑재된 전자총에 의해 높은 양 전위(positive potential)가 유지되는 가늘고 긴 많은 줄(tethers)로 줄 주위에 전기장이 형성되도록 한다(그림 4). 양(陽)적으로 충전된 줄은 태양풍 광자에 반발하여 그 경로를 비껴가고 광자로부터 운동량을 얻게 된다.

동시에 태양풍 프라즈마로부터 전자를 끌어들이는 다. 도달하는 전자 전류(electron current)는 전자총에 의해 보정된다.

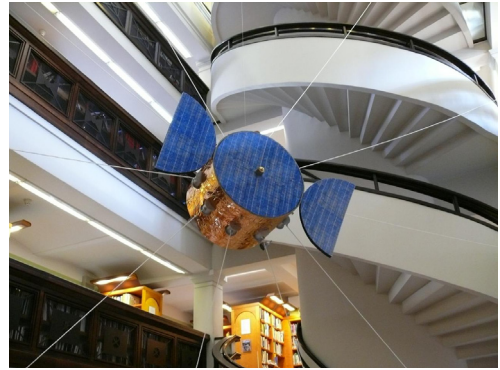


그림 4. 전기 태양풍 위성체의 모델

줄을 전개하는 방법은 비행체를 회전시켜 원심력을 유지하도록 한다. 각 줄의 전위와 각각의 태양 풍력을 미세 조정함으로써 비행체의 자세도 조정될 수 있다. 실제로 운용되는 전기 태양풍 항해에는 각 약 20 km의 길이를 가진 50-100 개의 끈에 뻗은 줄로 구성할 것을 제안하고 있다[6].

전기 태양풍 비행과 같이 우주에서 비행체를 가속하기 위한 기술 중 하나로 자성 비행(magnetic sail)이 검토되고 있다[7]. 자성 비행은 프라즈마 풍(wind)과 같이 태양에 의해 복사되는 충전된 입자를 비껴가도록 정적 자기장을 사용하는 것으로 운동량을 부가시켜 비행체를 가속시키는 것이다.

전기 태양풍 비행과 자성 비행은 우주 태양광 비행과 비교하여 추력을 통제하는 제한된 능력을 가지고 있고, 이것은 광원에 대하여 미러를 이동시킴으로써 옆으로 추진할 수 있도록 할 수 있다.

4. 태양광 비행선의 우주비행 시험

4.1 미국

2004년 7월에 NASA 마셜 우주비행센터에서 태양광비행 추진 팀에 의해 열진공 챔버에서 우주 태양광 비행선의 전개 기술을 성공적으로 시험한 바 있다.

이 시험을 바탕으로 하여 NASA의 에임즈 연구 센터 팀과 마셜 우주비행센터 팀은 NanoSail-D라고 부르는 태양광 비행선 우주발사계획을 수립하여 2008년 8월 3일 팰콘(Falcon) 1 로켓에 실어 발사하였으나 발사에 실패하였다. 이 우주비행 계획의 주된 목

적은 비행선 돛의 전개 기술을 시험하는 것이었다. 탑재된 NanoSail-D 비행체는 알루미늄과 플라스틱으로 제작되었고 위성체 무게는 4.5 kg이었다. 이 비행선 돛의 집광 표면(light catching surface)은 약 9.3 m²이었다[8].

4.2 유럽

1993년 2월 4일 러시아는 20 m 폭의 알루미늄으로 도금된 Mylar 반사망원경인 Znamya 2가 러시아 미르 우주정거장에서 비행선의 전개시험에 성공하였다. 비록 전개 시험은 성공하였지만 추진 시험은 수행되지 않았다. Znamaya 2.5에 의한 두 번째 시험에서는 전개 시험에 실패하였다.

국제 행성협회(Planetary Society), 코스모스 스튜디오(Cosmos Studio) 그리고 러시아 과학원(Russia Academy of Science)으로 구성된 연합 프로젝트 그룹에 의해 2005년 6월 21일 북극의 바렌츠해에서 러시아잠수함으로 우주 태양광 비행선인 Cosmos 1을 발사하였으나 로켓의 실패로 비행선이 목표 궤도에 도달하는데 실패하였다. 이 연합 프로젝트 그룹은 우주 태양광 비행선의 복제 모

델인 LightSail 1호, 2호 및 3호를 추가 제작하는 계획을 수립하였다. 추가 제작되는 비행선은 그림 5의 NanoSail-D와 같이 4개의 삼각 분절로 전개되는 32 m² Mylar 돛을 이용할 예정이다[9].

1999년 독일의 쾰른에서 그림 6과 같이 DRL과 ESA 공동으로 20 X 20 (m) 크기의 우주 태양광 비행선의 지상 전개 시험이 수행된 바 있다.

영국 서레이 대학교의 서레이 우주 센터 팀은 "CubeSail"이라고 부르는 태양광 비행선에 대한 우주개발 계획을 수립하였다. 이 태양광 비행선은 2011년 말에 발사할 예정이다. CubeSail은 CubeSat 표준을 기반으로 하고, 접혀졌을 때 3U 표준 볼륨(3, 100mm x 100mm x 100mm)이 된다. 우주 궤도에서 이 비행선은 사방 3.6m의 붐(boom)을 확장시켜 25 m²의 돛을 전개할 예정이다. 이 우주비행 계획의 주요 목적은 태양광 돛의 전개와 태양광 항해의 개념을 시험하는 것이다. 그리고 수명 종료시점에는 돛의 탄도 계수(ballistic coefficient)를 바꾸어 지구 대기권으로 재진입하는데 비행선의 돛을 사용할 예정이다. 이 우주 비행 계획의 최종 단계에서는 이 비행선이 궤도 변경(deorbiting) 장치로서 더 큰 위성체를 탑재하는 데 사용되고, 우주 파편(space debris) 문제를 해결하고자 하는 목적 때문에 언론의 주목을 받고 있다.

4.3 일본

2004년 8월 9일 일본 ISAS는 기상관측 로켓으로 두 대의 시제품인 우주 태양광 비행선의 돛을 전개하는데 성공하였다. 클로버 형태의 돛은 고도 122 km에서 전개되었고, 팬(fan) 형태의 돛은 고도 169 km에서 전개되었다. 이 두 대의 돛은 7.5 μm 두께의 필름을 사용하였다. 이 실험은 단지 전개 메카니즘의 시험이었지 추진 시험은 아니었다.

직경 15m의 우주 태양광 비행선이 2006년 2월 21일에 M-V 로켓으로 발사되어 우주 궤도 진입에 성공하였다. 이 비행선의 돛은 단계적으로 전개하였지만, 불완전하게 전개된 바 있다.

2010년 5월 21일 JAXA는 우주 태양광을 추진 장치로 하는 비행선인 IKAROS(Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the

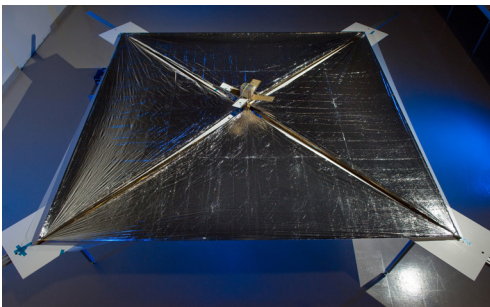


그림 5. Lightsail-1의 NanoSail-D



그림 6. DRL과 ESA의 Solar sail 전개

Sun)의 발사에 성공하였다[10]. 6월 10일에는 200 m²의 폴리이미드(polymide) 실험용 태양광 비행선의 돛 전개를 성공적으로 완료한 바 있다.

그리고 7월부터 태양광 복사에 의한 가속 시험(demonstration of acceleration)을 위한 다음 단계를 시작하였다. 이에 따라 7월 9일에 IKAROS는 태양의 복사에너지를 받아 도플러 효과를 이용하기 전에 수행되어야 하는 IKAROS와 지구 사이에 속도를 가속하는 정규화 데이터를 추가하여 새롭게 계산하는 RARR(range-to-range rate)에 의해 비행 궤도를 결정함으로써 광자 가속(photon acceleration)이 되고 있는 것을 확인한 바 있다. IKAROS에 의해 나타나는 이러한 데이터는 비행선이 전개되기 시작했을 때인 6월 3일 이후에 직접적으로 태양광 항해가 되고 있는 것처럼 보이고 있다. IKAROS는 회전 운동(spinning motion)을 통해 전개되는 가로 돛(square sail)의 대각선 길이가 20 m이고 폴리이미드의 두께는 7.5 μm 로 되어 있다. 박판(thin-film) 태양전지판은 돛으로 싸여져 있다. IKAROS는 금성까지의 항해에 6개월이 소요될 예정이고, 다음에 태양 반대편까지 3년 동안의 항해를 시작할 것이다.

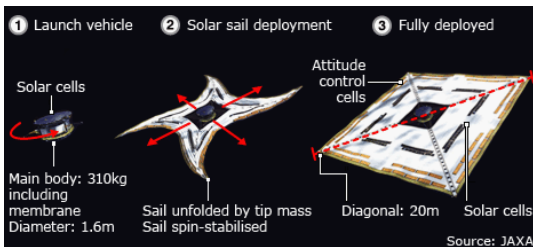


그림 7. Lightsail-1의 NanoSail-D 돛 전개

5. 결론

우주 태양광 비행선은 우주 비행에 추진 방법 중 하나로 개발되고 있다. 특히, 우주 태양광을 이용함으로써, 현재 우주 비행체에 필수적으로 탑재되는 추진 시스템으로 인한 무게 감소, 추진 연료에 의한 폭발 위험성 감소, 비행 속도의 증가 등의 장점을 가지고 있다.

그러나 태양광 비행선의 개발에 따른 기술적 실패가 많은 실정이고, 비행선의 재질 개발 그리고 비

행선 조정의 어려움 등 아직도 해결되어야 할 문제가 많다. 이러한 가운데 일본의 IKAROS 비행선의 성공은 전 세계 우주 과학자들의 많은 관심과 주목을 받고 있다.

국내에서도 태양광 비행선의 구조 설계와 재질 연구 등의 기초 연구가 시급히 시작되어야 할 것으로 판단된다. 또한 국내에서 개발되는 위성체나 우주 탐사선 등의 자세제어 혹은 우주 궤도에서의 방향 전환 등의 활용 방안도 검토될 수 있도록 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail
- [2] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/relativ/relmom.html>
- [3] Keith Lofstrom (2002). "Launchloop's discussion of launch altitudes"
- [4] Geoffrey A. Landis, Ohio Aerospace Institute (1999). [http://www.niac.usra.edu/files/studies/final_report/4Landis.pdf] "Advanced Solar- and Laser-pushed Lightsail Concepts"
- [5] Design & Construction". NASA JPL. <http://web.archive.org/web/20050311004606/http://solarsails.jpl.nasa.gov/introduction/design-const-ruktion.html>.
- [6] http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_sail#Electric_solar_wind_sail
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_sail
- [8] NASASpaceflight.com - SpaceX Falcon I FAILS during first stage flight
- [9] LightSail- 1 - A solar sail mission of the Planetary Society". The Planetary Society. http://www.planetary.org/programs/projects/solar_sailing/lightsail1.html. Retrieved 2009-11-10
- [10] <http://en.wikipedia.org/wiki/Ikaros>