

우주태양광발전 기술 동향

윤용식*, 최남미**, 이호형***, 최정수****

Technological Trends in Space Solar Power

Yoon, Yong-Sik*, Choe, Nam-Mi**, Lee, Ho-Hyung***, Choi, Jung-Su****

ABSTRACT

On 1968 Dr. Peter Glaser introduced the concept of a large solar power satellite system in a high geosynchronous orbit for collection and conversion of solar energy into an electromagnetic microwave beam to transmit usable energy to rectennas on earth. With respect to it, U.S.A, Japan, E.U., etc. noted the Space Solar Power(SSP) as a future new energy resource, performed a substantial research and the concept design, and recently announced detailed plans for realizing SSP projects. While the new technology of SSP is developing, U.S.A. and Japan have a plan to provide the electric service by using SSP 2030. This paper presents the technology trend of advanced countries and the domestic strategies on the SSP development as a green energy and a new energy resource.

초 록

1968년 미국의 피터 글레이저 박사가 정지궤도에 위성을 띄워 태양 에너지를 직접 받아 전기로 변환하여 지구로 송전하는 거대한 태양광위성의 개념을 소개한 바 있다. 이에 대해 미국, 일본, 유럽 등에서는 우주태양광 발전을 미래의 새 에너지원으로 주목하여 활발한 기초 연구와 개념 설계 그리고 최근에는 본 사업의 실현을 위한 구체적인 방안까지 발표하고 있는 실정이다. 현재 우주태양광발전 기술은 계속 개발 중으로 미국과 일본에서는 2030 년경에 실용화할 계획으로 있다. 본 논문에서는 그린에너지와 새 에너지원으로 주목받고 있는 우주 태양광발전에 대한 선진국의 기술 동향 및 국내의 추진 전략에 대하여 기술하였다.

Key Words : Space Solar Power, Space-Based Solar Power, Solar Power Satellite System, Solar Array, Microwave Beam, Rectenna, Geosynchronous Orbit, Green Energy

* 윤용식, 한국항공우주연구원 정책기획부 정책연구팀
ysyoon@kari.re.kr

** 최남미, 한국항공우주연구원 정책기획부 정책연구팀
nammi@kari.re.kr

*** 이호형, 한국항공우주연구원 통신해양기상위성사업단
hhlee@kari.re.kr

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

1. 서론

현재 전 세계는 대부분 석탄, 석유 등의 화석연료를 사용하여 전기를 생산하고 있다. 그러나 점차 이러한 화석 연료의 고갈로 인해 천연가스, 원자력 발전, 수력, 풍력, 지상태양열발전과 같은 다양한 대체 에너지를 이용하고 있다. 여기서 석유 소모량의 경우 선진국에서 에너지 소모에 약 40%를 점유하고 있는 실정으로 미국, 일본, 서유럽의 경우 하루에 6천만 배럴을 사용하고 있다[1]. 그러나 이 석유 소모량을 자동차, 화력발전 등을 통하여 전기에너지로 사용하는 데는 약 12백만 배럴 정도만을 사용하는 데 쓰인다. 그 이유 중 하나는 유연 자동차의 경우 효율이 15% 밖에는 되지 않기 때문이다. 그러나 전기자동차의 경우 80%의 효율을 나타내고 있어 유연 자동차에 비하여 매년 발생 등이 매우 적어 친환경 자동차로 각광받고 있다.

특히, 화석연료의 사용으로 온실효과가 발생하고 이에 따른 지구의 온난화 문제가 심각한 상황이다. 이러한 온난화에 따라 극지방의 해빙으로 인하여 점차 해수면이 높아지고 있으며 매년 이상 기후로 인한 자연재해가 속출하고 있는 실정이다.

이에 따라 선진국에서는 지구 환경을 파괴하지 않으면서 향후 전 세계 전기 소요량을 충족시킬 수 있는 새로운 대체 에너지로 우주태양광발전에 주목하고 있다. 우주태양광발전은 태양으로부터 오는 태양광을 우주에서 전기로 변환하고 지구에 전송하여 지구에서 전기에너지를 직접 사용하도록 한다.

본 논문에서는 우주태양광발전의 개념과 선진국의 기술 개발 동향 그리고 국내 추진 방안 등에 대하여 기술하였고 국내에서 우주태양광발전에 대한 개념을 이해하도록 하는데 도움이 되고자 한다.

2. 우주태양광발전의 개념 및 특징

2.1 우주태양광발전 개념

우주태양광발전은 우주 공간에서 태양 빛으로 전기를 만들어 지구로 보내는 것을 의미한다. 현재 우주태양광발전으로 구상하고 있는 전기발전 개념은 아래

그림 1과 같다[2]. 먼저 지구 상공 36,000 Km의 정지궤도에 수 Km 길이의 태양 전지판을 단 태양발전 위성(Solar Power Satellite, SPS)을 띄워 이 위성이 태양 빛을 받아 전기를 생산하고, 여기서 발생한 전기를 지구로 전송하도록 하는 것이다. 이때 전송되는 전기에너지는 파장이 매우 짧은 마이크로파(microwave)나 레이저를 사용한다. 우주로부터 전송되는 전기는 지상에서 수신안테나와 같은 지상 장비를 이용하여 에너지를 전송받아 파워그리드(power grids)와 같은 장치에 담아 에너지원으로 사용하도록 한다.

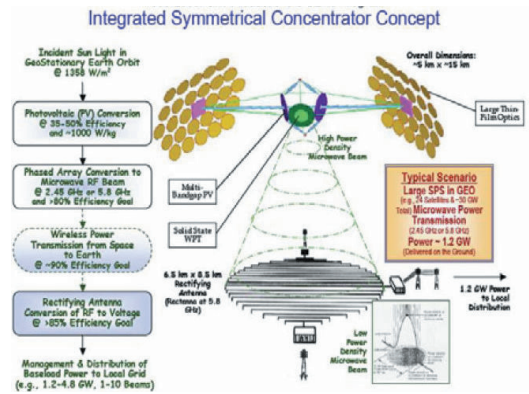


그림 1. Space Solar Power Concept

2.2 우주태양광발전 특징

우주태양광발전은 지상에서 생산되는 에너지원과 다음과 같은 차이점 및 장점이 있다[3]:

- (1) 지상에 비해 우주공간에서 복사에너지가 약 10 배가 크므로 태양광 획득 효율이 큼
- (2) 우주공간에서 자동화·무인화로 발전설비 비용이 저렴
- (3) 우주 공간에서 복사선에 의한 성능의 저하가 늦어 수명이 길다
- (4) 기후 조건에 의한 영향이 적음
- (5) 지상에서 화력 혹은 원자력 발전으로 인한 이산화탄소의 발생을 획기적으로 감소시킬 수 있는 최첨단 환경기술로 지구온난화 대책이나 에너지의 안정적 공급에 획기적인 기술로 대두

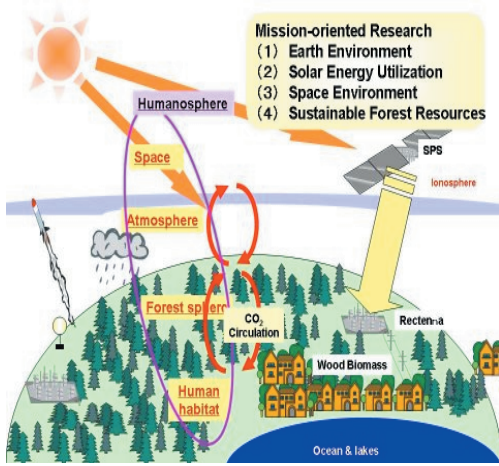


그림 2. SSP Advantage

2.3 우주태양광발전의 중요 소요 기술

(1) 태양광발전 위성

인공위성에 거대한 태양광발전 장치를 실어 우주 궤도에 발사한 후 여기서 얻는 전기에너지를 마이크로파 혹은 레이저로 변환시켜 지상에 보내면 지상에서 다시 전기에너지로 변환하여 이용하도록 하는 위성으로 정지궤도에서 운용된다.

(2) 태양전지판

우주태양광발전 기술이 1970년대 기술로는 시간당 1KW의 전력을 지구로 보내기 위한 장치를 제작하는데 3,000억 달러~1조 달러가 들 것으로 예상하였다[4]. 이것은 태양전지판을 장착한 인공위성 개발 경비, 위성 발사 경비 그리고 우주에서 수백 명의 우주인들이 태양전지판을 조립하는 비용을 포함한 것이었다. 또한 태양전지판의 효율이 1990년대 15%에 불과하였고, 당시 2020년에 가서도 25%에 그칠 것으로 예측하였다. 그러나 최근 보잉의 자회사인 스펙트로랩(Spectrolab)사는 40.5%의 효율을 가진 태양전지판을 제작하였고[5], 우주에서의 태양전지판의 설치도 사람이 아닌 로봇이 수행하도록 계획함으로써 경비 절감이 가능하게 되었다.

(3) 태양광 전송 기술

전선을 사용하지 않고 전파 혹은 빛의 형태로 위성에서 지상으로 전력을 보내는 기술로 현재 마이크로파 송전과 레이저 송전 기술이 개발되고 있다.

(가) 마이크로파 송전(Microwave Power Transmission)

파장이 3 - 30cm인 마이크로파는 대기권의 비나 구름으로 인한 감쇠율이 낮아 전리층에서의 산란이나 산란이 없어 우주태양발전 위성에서 생성된 전력을 지상으로 송전하는데 알맞은 주파수이다[1]. 우주에서 지상으로의 송전은 송전에 필요한 대형 마이크로파 발생관(마그네트론, 안프리트론, 크라이스톤 등)을 이용하여 60 - 80%의 효율로 마이크로파를 송출하면 지상에 설치된 안테나로 수신하게 된다. 송출되는 마이크로파의 밀도를 높이는 경우 생물이나 인간에 나쁜 영향을 줄 수 있으므로 태양광 에너지 밀도의 1/10 정도를 제한하고 있으나 이런 경우 안테나의 면적이 넓어지게 된다. 현재까지 종합 송전효율은 46% 정도로 향후 98%를 목표로 설정하고 있으나 생물체에 대한 영향 연구가 병행되어야 한다.

(나) 레이저 송전(Laser Transmission)

파장 폭이 큰 태양광을 흡수하는 크롬과 태양광을 효율적으로 레이저광으로 변환시키는 네오짐을 세라믹 재료에 고밀도로 주입하여 발생된 레이저로 지상에 전력을 송전하는 것으로 현재까지 태양광 에너지의 42%를 레이저로 변환하는데 성공한 바 있다[6].

3. 우주태양광발전의 기술 동향

우주태양광발전의 기본 개념은 1968년 미국의 글레이저 박사에 의해 최초로 제안되었다[7]. 36,000 Km의 정지궤도에서 태양에너지를 수집하고 전기에너지로 변환하여 마이크로 빔으로 지구에 전송하면 렉테나(rectenna)라고 불리는 지상 안테나에서 받아 전력을 공급하는 것으로 최근 태양전지기술의 발전과 단위중량당 발생전력이 열발전보다 좋아지고 있어 태양광발전 방식으로서의 기술에 주목하고 있는 추세이다.

3.1 미국

1968년 미국에서 우주태양광발전 개념이 발표되어 NASA에서 1970년대에 오랫동안 광범위한 검토를 수행하였다. 1979년 NASA를 중심으로 5GW 발전량의 우주태양광발전소 건설을 추진하였으나 기술력과 경제성 부족으로 계획이 보류된 바 있다.

그러나 1994년 미국공군에서 페가수스 로켓으로 저궤도로 발사된 위성체를 이용하여 광전기 실험을 수행한 바 있다.

그리고 NASA는 1995년부터 1997년까지 우주태양광발전에 대한 개념과 기술에 대한 "Fresh Look" 연구를 수행 하였다[8]. 또한 1999년부터 NASA는 우주태양광발전 탐사 연구와 기술 프로그램을 본격적으로 시작하였다. 2000년 NASA의 Mankins는 미하원에서 대규모 SSP는 현재 기술과 능력에 있어 대단히 중요한 진보를 필요로 하는 매우 복잡한 시스템으로 기술 로드맵을 개발하여 수십 년에 걸쳐 모두 필요한 진보를 얻기 위한 방법을 강구해야 한다고 발표한 바 있다. 2001년 NASA의 Marzwell은 앞으로 15년에서 25년 후에는 전기 공급선 등이 필요없이 우주태양광발전에 의해 킬로와트당 7 - 10 센트의 비용으로 사용이 가능할 것이라고 언급한 바 있다[9].

2007년 미 국방부 산하 '국가안보우주국(National Security Space Office)'에서는 "우주 태양광 발전에 기술적 문제는 없다"는 보고서를 발표한 바 있다. 이 보고서에는 우주태양광발전을 통해 지구의 어느 지역이나 전기 공급이 가능하게 됨으로써 미래 경제적, 군사적 분야에서의 미국의 선도적 역할을 지속하고자 하는 계획도 포함되어 있다[4].

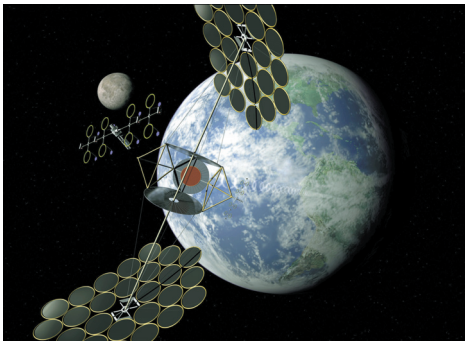


그림 3. Concept of U.S. SSP

그리고 미국은 2007년 국제우주정거장(ISS: International Space Station)을 이용한 전력에너지의 전송시험 계획을 수립하였고 2008 - 2011까지 시험을 수행할 예정이다. 이 시험은 ISS에서 태양광 발전을 하여 위성을 향해 전력을 전송하는 것으로 운용 중인 위성을 충전하여 위성의 소형화 및 수명 연장 가능 여부를 수행할 예정이다[10]. 미국 캘리포니아 북부 전력회사 PG&E사는 2009년 캘리포니아 에너지 벤처 기업인 '솔라렌'과 2016년부터 정지궤도상의 태양 전지판으로 생산된 전력 200MW를 매입하기로 합의하고, 주공공전력 위원회에 허가를 요청하였다[11]. 여기서 200MW는 약 15만 가구에 전력 공급을 할 수 있는 전력으로 캘리포니아의 프레스노 지역에 무선파(radio frequency)를 수신할 수 있는 지상시설을 설치할 예정이다.

3.2 일본

일본은 1998년부터 JAXA주관으로 태양광발전 기술을 개발하였다. 이에 따라 경제산업성(METI)과 제휴한 공익법인이 태양광 발전소의 개념 설계를 수행하여 2015년부터 2020년 사이에 10 - 100MW급 전력을 생산할 수 있는 태양발전위성 발사하고 2030년 경부터 1GW급 우주태양 발전소가 상업운전을 시작할 것으로 계획한 바 있다. 여기서, 1GW는 원자력발전소 1기의 전력생산량에 해당한다[12].

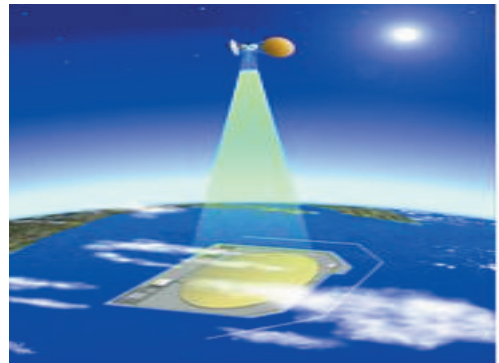


그림 4. Concept of Japan SSP

2001년 JAXA에서는 1킬로와트에서 1메가와트 사이의 전기를 생산할 수 있는 능력을 가진 실험위성을

발사하여 우주태양광발전의 추가 연구 등을 수행할 계획이라고 발표한 바 있다. 2007년 오사카대 레이저 공학 연구소와 JAXA는 우주에서 만들어진 태양광을 레이저로 변환하고 지상으로 전송하는 기술을 개발하고 있으며 우주태양광에너지 42%를 레이저로 변환하는데 성공하였다고 발표한 바 있다[6]. 또한 JAXA가 주관하는 태양광 발전 실용화를 위한 시험의 일환으로 2008년 플라스틱 필름과 같이 얇고 접을 수 있는 텍스타일을 개발하여 재해발생시 가정용 전원을 사용할 수 없는 경우 상공의 비행선으로부터 약한 마이크로 와 전력을 공급받아 휴대전화 충전 등에 사용하는 시험을 수행 중에 있다.

2009년 6월 2일에는 일본수상 주재의 “우주개발 전략본부”에서 일본의 우주기본 계획[13]을 발표하였다. 이 계획 중에는 “우주로부터 지구로 전력을 전송하는 기술에 필요한 연구 개발 추진 예정”인 우주 태양광발전 계획이 포함되어 있다.

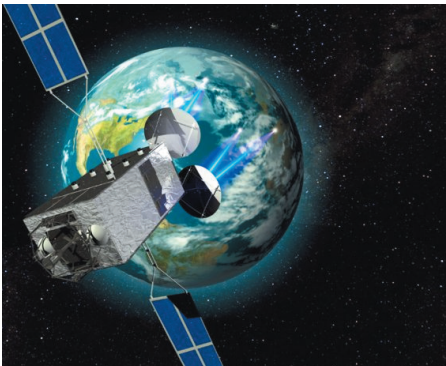


그림 5. Laser Transmission of Japan SSP

또한 ESA Advanced Concepts Team은 우주태양광발전 유럽 네트워크(European Network on Solar Power Satellites)의 설립을 제안하여 2002년 8월 설립하였고, 이 네트워크에서는 유럽 우주분야의 신규 에너지에 대한 연구를 목표로 하고 있다. 유럽연합은 2004년에 우주태양광발전의 연구에 따른 결론을 발표한 바 있고 연구의 주요 내용은 다음과 같다.

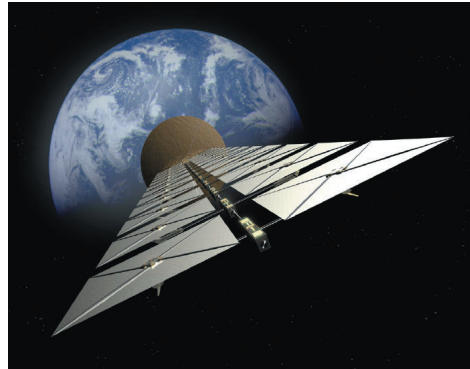


그림 6. European Sail Tower of EU SSP

- SPS 사업에 대해서 아직까지 기술적 위험성이 있다. 따라서 기술적 한계가 있는 사항들에 대하여 더 많은 연구가 요구된다.
- 우주태양광발전은 국제적인 노력으로 수행되어야 한다.
- 발사비용이 상당한 수준 정도로 낮아져야 한다.

현재 유럽연합에서 수행하고 있는 우주태양광발전을 위한 European Sail Tower는 15km 길이의 태양 전지판으로 450MW를 생산하는 것으로 수명은 60년, 생산단가는 0.075 €/kWh를 계획하고 있다[16].

3.3 유럽연합

유럽연합에서도 우주 태양광 발전에 대한 연구를 1990년 이후부터 활발하게 추진하고 있다. 1999년 독일 우주 연구기구인 DLR은 EU차원에서 우주태양광발전 연구 수행을 위하여 ESA와 계약한 바 있다 [14]. 2001년에는 ESA에서 NASA와 태양전지기술과 혁신적인 태양전지판 전개기술을 조합한 space solar tower의 개념을 가진 “European Sail Tower SPS”를 발표한 바 있다[15].

3.4 기타 우주태양광발전 사업

남태평양 팔라우국은 2007년 미국 웰섬 우주발전(Welsom Space Power)사와 계약하여 지구 상공 480 Km에 떠있는 위성에서 태양광 발전으로 얻어진 1MW 전력을 지름 79m의 안테나로 전송받아 1,000 가구에 전력을 공급할 예정이라고 발표한 바 있다.

또한 미국, 스위스, 독일에서는 컨소시엄 형태로 총 8억 달러의 비용으로 2010년까지 초경량 태양전지판

을 제작하기 시작하고, 발사체, 위성, 송전 기술을 개발하여 최종적으로 2012년까지 태양광 발전 시험을 수행할 예정이다.

4. 우주태양광발전에 따른 효과

4.1 경제성

현재 우주태양광발전에 가장 적극적인 국가는 일본으로 미국과 유럽연합에서도 현재의 기술 수준에 비추어 매우 적극적으로 사업 추진을 수행하고 있다. 로켓 발사 기술의 발전에 따라 10년 전에 450g의 물체를 우주에 보낼 때 약 12,000 달러가 소요되었으나 현재는 5,000 달러면 충분하고, 유가도 2005년 대비 2배가 올라 우주태양광발 사업은 상업성에서 충분한 효용성이 있는 것으로 평가된다[4]. 현재의 기술 수준으로 정지 궤도 36,000 km에 2 km X 2 km의 태양 발전을 하는 경우 1기의 원자력 발전소에 해당하는 1GW의 전력을 생산할 수 있을 것으로 판단하고 있으며 태양전지판의 현재 효율인 42%이상으로 개발되면 이보다 더 많은 전력 생산이 기대된다. 본 사업이 상용화되는 경우 전력 이동이 자유로워 외국으로의 전력 수출도 가능하다. 또한 본 사업에 따른 신사업 분야가 다양하게 창출됨으로써 고용 효과 및 경제 안정에 많은 기여를 할 것으로 판단된다[1].

4.2 환경적 이익

전문가들은 2030년경 화력 발전에 50%를 태양광 발전으로 대체하는 경우 2억 5,300만톤의 이산화탄소 저감 효과를 얻을 것으로 예상하고 있다[1]. 그러나 위성에서 지상으로 송전하는 방식인 마이크로파 혹은 레이저에 의한 생태학 및 환경에 대한 영향 연구가 더 필요한 것으로 판단된다.

5. 국내 우주태양광발전 사업을 위한 기술 분석

5.1 우주태양광발전 위성

우주태양광 발전은 정지궤도 36,000km에서 수행되는 위성에 의해 수행되어야 한다. 현재 국내 정지궤도 위성 개발은 통신해양기상위성 1호가 개발되어 2010년 상반기 발사 예정으로 본 위성 개발에 따른 정지궤도위성의 개발 기술이 습득되고 있는 단계이다. 또한 2016년에 국내 주도로 정지궤도위성이 개발되어 발사될 계획으로 우주태양광위성 본체 개발에 도움이 될 것으로 판단된다. 그러나 우주태양광발전 위성의 기초 기술 연구를 위해 과학기술위성과 같은 시험위성을 최소한 3기 이상 개발하여 태양광발전에 대한 시험을 수행하여야 할 것으로 생각된다.

5.2 태양광 전송 기술 및 태양전지판

현재 국내에서 마이크로파나 레이저에 의한 전력 전송 연구는 미진한 것으로 판단되며, 국내 대학이나 전기연구원 혹은 한국전자통신연구원 등과 같은 전문 출연 연구원에 의한 기초 연구 및 송수신장치의 개발이 시작되어야 할 것으로 판단된다. 우주와 지상간의 마이크로파 전송 효율은 95% 이상이 되어야 할 것이다.

또한 국내에서 지상용 태양전지판은 세계적으로도 인정받는 고효율의 태양전지판을 개발하고 있으나 위성용 태양전지판 제작기술은 전무한 실정이다. 따라서, 이러한 고효율 지상용 태양전지판 개발 경험을 바탕으로 50%이상의 우주용 고효율 태양전지판 기술 개발이 시급한 실정이다. 국내에서 광주과학기술원이나 한국에너지기술연구원 등에 의해 개발이 가능할 것으로 사려 된다.

5.3 무인로봇 기술

미국에서는 우주궤도 약 200km에 위치한 국제우주정거장에서 우주태양광발전 위성을 총 조립하여 36,000km의 우주 궤도로 보내는 것을 구상하고 있다. 왜냐하면 36,000km에서의 작업이 매우 힘들고 위험부담이 크므로 일단 지구 대기권 밖에서 총 조립을 수행하고, 총조립된 우주태양광발전 위성을 36,000km의 우주궤도로 이동시키는 것이 더 쉬울 것으로 판단하기 때문이다. 그리고 국제우주정거장에서도 2 - 3 km 정도 크기의 태양전지판을 우주인에 의

해 총조립하는 것이 어려울 것으로 판단하여 태양전지판 조립 로봇을 이용하려고 한다. 따라서 국내에서도 우주궤도에서 우주태양광발전 위성의 조립을 위한 학습형 지능을 가진 조립 로봇의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

5.4 발사체

2009년 8월 한국항공우주연구원에서는 100kg급 위성을 지구 저궤도에 발사하는 KSLV-1를 발사한 바 있다. 또한 2018년 1.5톤급 위성을 600 - 800km의 태양동기궤도에 올리기 위한 KSLV-2의 개발이 추진되고 있다. 이 사업이 성공하면 2025년 자력 로켓을 사용하여 달 탐사 위성을 발사할 예정이다. 따라서 현재 계획되고 있는 로켓 기술 개발이 성공적으로 수행되는 경우 태양광발전위성의 우주궤도 36,000 km까지 발사가 가능한 자국 로켓의 개발에 많은 도움이 될 것으로 생각된다.

6. 결론

우주태양광발전은 석유 등 화석 연료의 고갈에 따른 화석 연료에 의한 전기 생산을 대체할 수 있는 신재생 에너지이다. 그리고 우주에서의 전기 생산으로 지상의 지구 온난화를 억제할 수 있는 크린 에너지이다. 또한 태양에너지로부터의 에너지원을 사용함으로써 자원 채취를 위한 지구의 자연 훼손이나 지구 자원의 고갈을 걱정하지 않아도 되는 무한 에너지이기도 하다.

이러한 우주태양광발전이 앞으로 20, 30년 후 미국, 일본, EU 등을 중심으로 주도되어 운용되는 경우 세계 경제에 미치는 영향이 매우 클 것으로 생각된다.

이에 따라 우리나라에서도 우주태양광발전의 연구가 시급한 실정으로 우주태양광발전에 대한 기술 및 경제 타당성 조사와 관련 기술의 로드맵 수립을 통한 핵심 기술의 선정 그리고 관련 기술의 기초 연구 등이 수행되어야 할 것으로 본다. 또한 우주태양광발전의 사전 예비 시험을 위하여 과학기술위성의

발사 및 운용을 통한 사전 검토 작업도 수행되어야 할 것이다.

참고문헌

- [1] <http://www.permanent.com/p-sps-bm.htm>
- [2] Space Solar Power Satellite Technology Development at the Glenn Research Center—An Overview James E. Dudenhofer and Patrick J. George, NASA Glenn Research Center, Cleveland, Ohio
- [3] <http://www.nss.org/settlement/ssp/>
- [4] National Security Space Office, Interim Assessment Release 0.1, "Space-Based Solar Power As an Opportunity for Strategic Security, Phase 0 Architecture Feasibility Study", 10 October 2007
- [5] http://generalenergysolar.com/review/General_Energy_LC_R5.pdf
- [6] <http://www.inhabitat.com/2008/02/18/round-the-clock-solar-energy-from-space-solar-power-system/>
- [7] Glaser, Peter E. (22 November 1968). "Power from the Sun: Its Future" (PDF). Science Magazine 162 (3856): 857-861. <http://www.sciencemag.org/cgi/reprint/162/3856/857.pdf>.
- [8] http://spacefuture.com/archive/a_fresh_look_at_space_solar_power_new_architectures_concepts_and_technologies.shtml
- [9] http://en.wikipedia.org/wiki/Space_solar_power
- [10] http://www.space.com/business/technology/space_solarpower_010302.html
- [11] <http://www.grist.org/article/2009-04-16-solera-space-solar/>
- [12] http://www.ubergizmo.com/15/archives/2008/02/space_solar_power_system.html
- [13] 일본 우주개발전략본부, 일본우주기본계획, 2009
- [14] ESA/DLR: System Concept, Architectures and Technologies for Space Exploration and Utilisation (SE&U Study), European Space Agency Contract Report; 1999
- [15] W. Sebolt, M. Klimke; European Sail Tower SPS Concept, Acta Astronautica Vol. 48, No.5-12, pp.785-792, 2001
- [16] L. Summerer, "Solar Power Satellites- European Approach", ESA Report, 2004