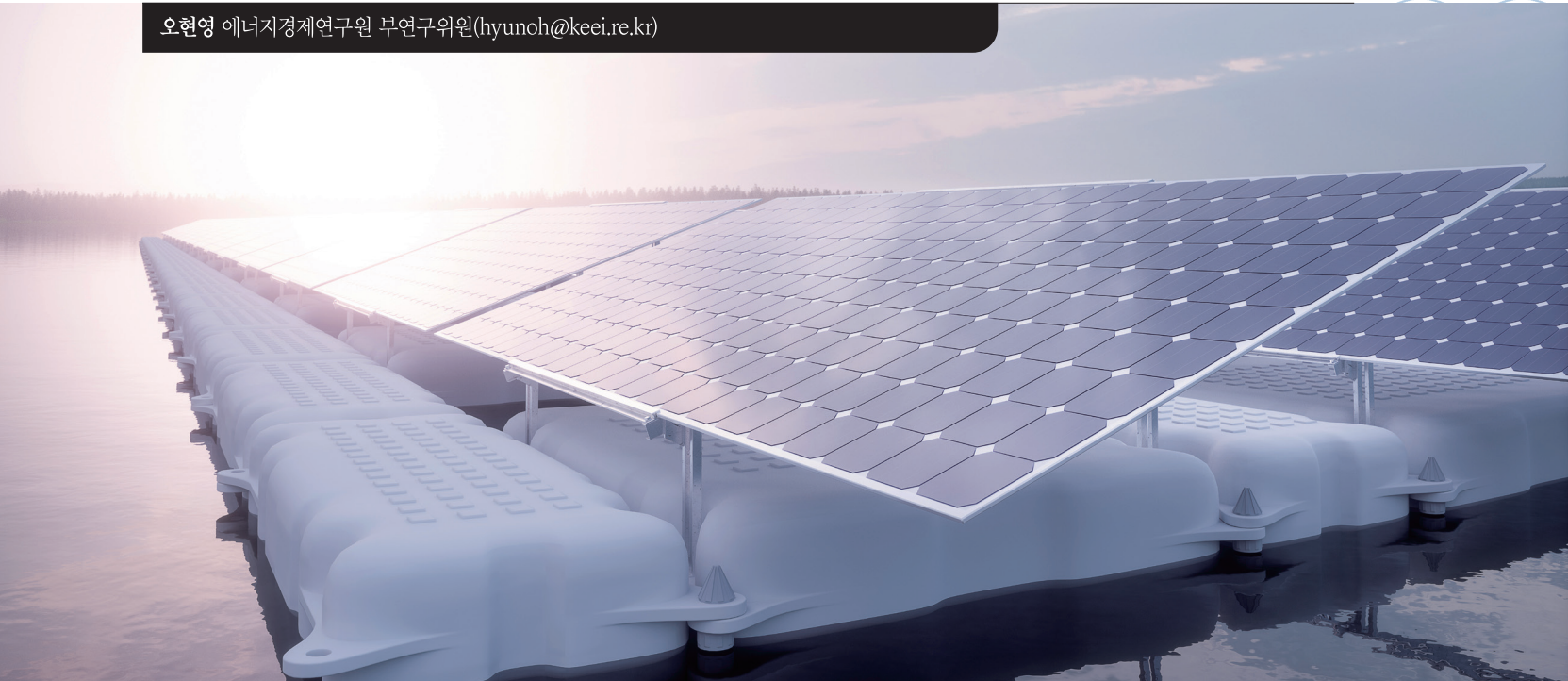


수상태양광의 해외 보급 동향과 시사점

오현영 에너지경제연구원 부연구위원(hyunoh@keei.re.kr)



1. 머리말

최근에는 저수지 수면에 태양전지 패널이 설치된 모습을 종종 볼 수 있다. 에너지업계에서는 이를 지상이 아닌 수상에 설치된 태양광이라 하여 ‘수상태양광’이라고 부르고 있다. 전 세계 어디에서든지 호수, 강, 저수지, 바다 등의 수변은 대개 휴식과 관광을 즐기는 장소가 된다. 물을 중심으로 펼쳐진 자연경관은 거의 모든 사람에게 선호되며, 보통 공공자원이기 때문이다. 그러한 자연경관의 중심인 수면에 인공 시설물인 태양광 발전설비를 설치하는 것은 처음에는 사람들에게 낯설게 받아들여질 수도 있다. 따라서 국민들에게는 수상태양광이 왜 보급되고 있는지 설명이 필요할 것이다.

신재생에너지 기술개발 및 보급을 위한 대체에너지개발촉진법의 제정 및 시행이 1988년 초였고, 이후로 33년이란 긴 시간이 흘렀다. 그럼에도 불구하고 여전히 재생에너지에 대한 국민여론 조사에서는 재생에너지 확대보급에 동의하는지를 묻고 있다. 100% 찬성은 아니지만, 대체로 이러한 여론조사에서 국민들은 재생에너지 확대보급에 동의하고 있다. 이처럼 재생에너지 보급 확대에 동의하는 경우, 현재 재생에너지 발전원 중에서 보급이 가장 용이하다고 평가받는 기술이 태양광이라는 것도 이해할 수 있을 것이다. 그렇기에

정부도 2020년에 발표한 그린뉴딜에서 태양광을 풍력과 함께 향후 2025년까지 30GW 추가 보급하겠다고 발표한 것이다. 태양광의 대규모 보급에서 문제는, 대규모로 태양광을 설치할 부지를 전국 곳곳에서 마련하기가 상당히 어렵다는 것에 있다. 태양광이 가진 친환경성, 기술성숙도, 국내 산업경쟁력 등의 장점을 보급으로 실현하기 위해서는 비교적 새로운 개념인 수상태양광도 고려해 보아야 하는 것이다.

본고는 수상태양광에 대한 이해를 넓히기 위하여 특징과 보급현황을 중심으로 이를 설명하고자 한다. 우선 수상태양광의 개요를 설명하고, 보급의 배경과 정책적 필요성을 논한 다음에 지상 태양광과 비교 시의 장점에 대하여 검토한다. 다음으로는 수상태양광의 특징과 유형에 대해서 살펴본다. 또한 수상태양광의 보급 현황 및 여건을 살펴보고, 국내 보급에서의 이슈도 검토한다. 마지막으로 수상태양광의 국내 보급에 관한 시사점을 도출한다.¹⁾

2. 수상태양광 개요 및 보급 필요성

‘수상태양광’은 호수, 저수지, 댐, 연못 등의 수면에 설치하는 태양광 발전시스템을 지칭하는 말이다. 세계 최초의 수상태양광은 2007년에 일본 아이치현에서 20kW급의 연구용으로 설치되었다. 이후 빠르게 발전을 거듭하여 불과 십여 년 만인 2018년에 중국에서 150MW급의 대규모 수상태양광 설비가 완공되었다.²⁾ 국내에서는 2009년에 저수지와 댐에 연구용 설비를 설치하면서 수상태양광이 시작되었다.³⁾ 이후 기술개발 및 신설이 가속화되고 있으며, 2020년 말에는 국내 최대 규모의 25MW급 수상태양광 설비가 전남 고흥의 간척호수에 설치되었다.⁴⁾

그림 1 전남 고흥의 25MW급 수상태양광 발전소



자료 : 한국중부발전, 보도자료 “한국중부발전-탐인프라, 국내 최대 수상태양광 발전소 엔택트 온라인 준공식 거행”, 2020. 11. 30.

1) 본고는 해외문헌의 kWp(kW-peak), MWp(MW-peak) 등을 모두 kW, MW 등으로 표기함.

2) World Bank(2019), p. 16, p. 59 참고.

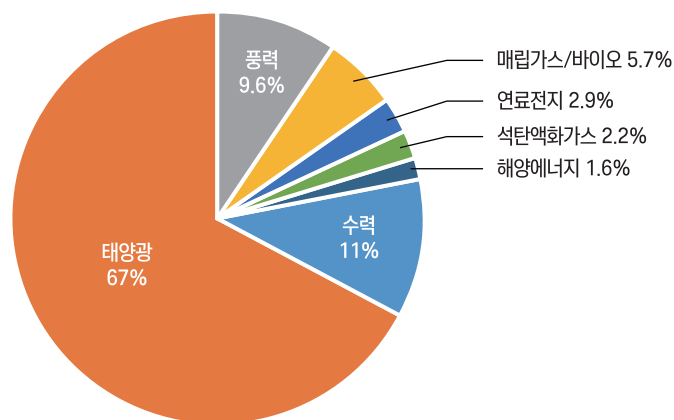
3) 한국수자원공사(2014), p. 8 참고.

4) 한국중부발전(2020) 참고.

수상태양광은 주로 도시지역의 인구밀도가 높은 중국, 대만, 일본, 한국 등의 국가에서 특히 주목받고 있다. 태양광은 기후변화 대응을 위해 재생에너지 보급률을 비약적으로 높이고 싶은 국가에서 우선적으로 접근하는 기술이다. 그렇지만 인구밀도가 높은 국가는 대규모 설치부지 확보에 어려움을 겪어 왔다. 수상태양광은 유희수면을 활용하기 때문에 태양광 발전 이외의 타 용도로 활용 가능한 토지를 점유하지 않는다. 또한 수상태양광은 ‘대규모 태양광이 이미 부족한 녹지를 훼손하고 있다’는 비판도 받지 않게 해준다. 따라서 정책적으로 태양광을 통한 재생에너지 보급 확대를 목표로 하면서, 인구밀도가 높은 국가들에서 수상태양광에 대한 관심이 특히 높은 것으로 보인다.

우리나라의 경우 그린뉴딜을 반영한 제5차 신재생에너지 기본계획에서 2034년 발전량 중 재생에너지 비중을 2019년 5.0% 대비 22.2%까지 확대하는 목표를 수립하였다. 특히 그린뉴딜에서 태양광은 풍력과 함께 재생에너지 보급의 핵심수단으로 부각되었다. 그린뉴딜의 태양광·풍력 보급목표는 합계 발전용량을 2019년 12.7GW에서 2025년 42.7GW로 증가시키는 것이다. 그런데 발전차액지원제도(FIT)부터 현재의 공급의무화제도(RPS)까지 약 20여 년에 걸친 정부 신재생에너지 보급사업의 결과, 태양광이 신재생 발전설비 중에서도 압도적으로 많은 67%(2019년)를 차지하고 있었다. 풍력의 비중은 겨우 9.6%에 불과했다. 이는 신재생 발전설비를 구축하는 사업자와 이를 지원하는 정부가 그동안 집중했던 태양광이 이후에도 현재 비중 이상의 역할을 해야만 정부 보급목표 달성이 가능하다는 것을 보여준다. 풍력, 연료전지, 바이오에너지 등이 그동안 태양광만큼 보급될 수는 없게 만들었던 여건(입지, 경제성, 환경성, 주민수용성, 잠재량, 운송 등)들이 앞으로 빠른 시일 내에 모두 해결될 수는 없을 것이기 때문이다. 따라서 태양광은 앞으로도 한 동안 대규모 신재생에너지 보급을 주도할 수밖에 없다.

그림 2 2019년도 신재생 발전설비 원별 비중



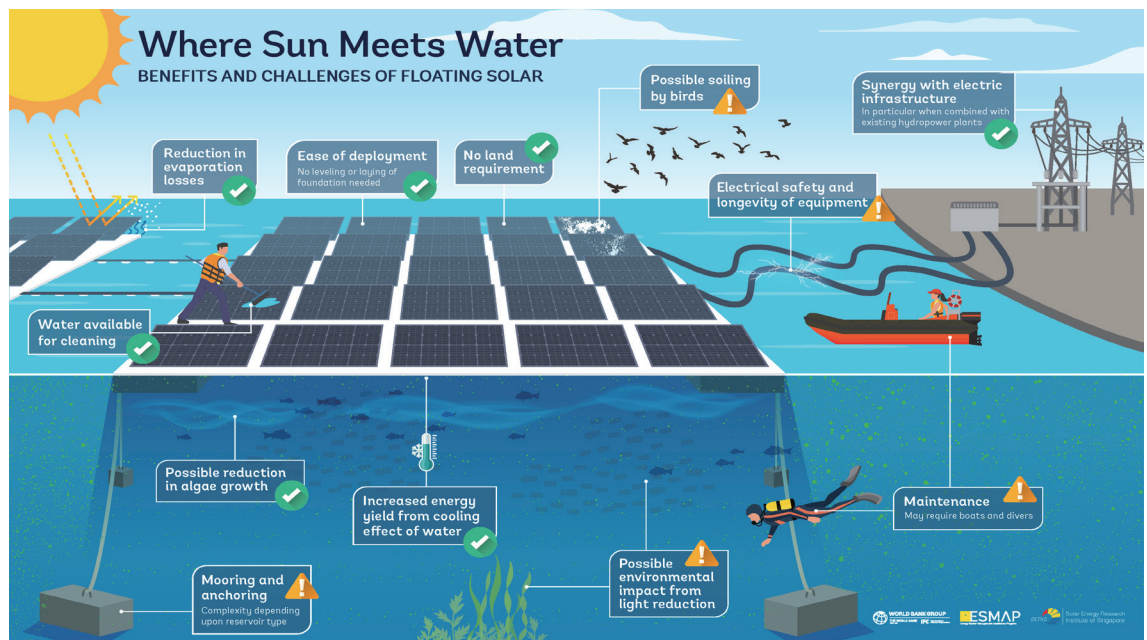
자료 : 전력거래소, 2019년도 발전설비현황, 2020. 7.

지상 태양광과 비교했을 때 수상태양광의 첫 번째 장점은 앞서 언급했듯이 설치할 토지가 필요 없다는 점이다. 지상 태양광은 토지 이용을 위해서 높은 지가와 기회비용을 감당해야 한다. 하지만 수상태양광은 토지 이용과 관련된 문제를 거의 겪지 않는 편이다. 대신에 수상태양광은 수면의 사용허가, 주민동의, 계통연

계 등에서 문제가 생기지 않게 추진해야 한다. 수력발전소와 연계하여 설치하는 수상태양광은 계통연계 문제를 크게 겪지 않는다. 또한 지상 태양광은 일사량을 최대화하기(음영 회피) 위해서 부지의 주위 건물과 지형 등을 고려해 패널의 설치 높이, 간격 등을 설정해야 하고, 부지정리도 되어야 하지만 수상태양광은 그러한 여건들을 고려하지 않아도 된다.

물의 증발 냉각⁵⁾ 효과는 태양전지 모듈의 온도(출력 중)를 낮출 수 있다.⁶⁾ 싱가포르의 수상태양광 실증연구⁷⁾에 따르면 수면 주변의 기온이 인접한 지상보다 약 1~3℃가 낮았다. 모듈의 온도는 지상보다 5~10℃가 낮았는데, 부유체 구조물 내부의 환기 여건에 따라 달라졌다. 모듈이 물과 열적으로 잘 접촉하는 경우 냉각 효과가 훨씬 더 클 수 있다. 모듈 온도 상승은 태양광 시스템의 주요 손실 요인이다. 그러므로 수상 조건에서 자연 발생하는 모듈 냉각 작용은 지상의 동일 용량 대비 태양전지의 발전량을 상당히 증가시킬 수 있다. 또한 개방된 수역의 풍속은 지상보다 높은 경향이 있으므로 모듈 냉각을 용이하게 한다. 이 외에도 태양전지 패널 표면의 먼지 퇴적량이 지상보다는 수상에서 더 적어지기 때문에 그에 따른 발전량 손실도 수상에서 개선될 것으로 예상된다. 이러한 장점들에 의해서, 초기의 일부 수상태양광에서 지상 태양광보다 발전량이 10% 이상 증가한 사례가 보고되었다.^{8) 9)}

그림 3 수상태양광의 장점과 과제



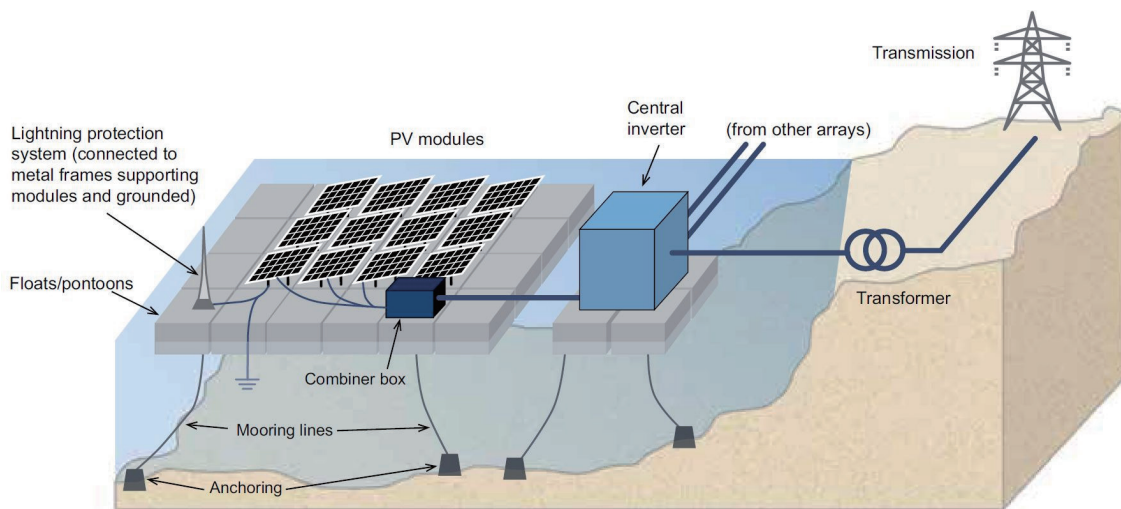
자료 : ESMAP 웹페이지

- 5) 증발 냉각(evaporative cooling) : 주위의 열을 흡수하여 액체에서 기체로 상태변화를 하는 증발작용에 의해서 주변이 냉각되는 현상(대한건축학회 건축용어사전)
- 6) 태양전지판의 온도 상승은 발전량 감소 원인이 됨(한국전기안전공사, 태양광 발전설비 점검 지침, 2018년 9월 20일 제정)
- 7) Liu, H. 외(2018)
- 8) Trapani 외(2015), Choi 외(2013)
- 9) 수상태양광의 기술적 장점은 World Bank(2019)를 참고

3. 수상태양광의 특징

수상태양광 시스템의 전기장치적 구성은 태양전지 어레이와 인버터가 수면에 떠 있다는¹⁰⁾ 점을 제외하면 지상의 태양광 발전시스템과 유사하다.¹¹⁾ [그림 4]는 중앙 인버터를 사용하는 대규모 수상태양광 발전소의 일반적인 설비구성을 보여준다. 태양전지 모듈에서 생산된 전기는 접속함(combiner box)을 통해 수집되고, 인버터에 의해 직류(DC)에서 교류(AC) 전기로 변환된다. 수면에 띄우고 태양전지 패널을 엮는 부유체(floats)와 고정(anchor) 및 계류(mooring) 장치는 모든 수상태양광 설치에서 필수적인 요소이다.

그림 4 일반적인 대규모 수상태양광 시스템의 개략도



자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.2

현재 대부분의 대규모 수상태양광은 폰툰(부력장치)형¹²⁾ 부유체 위에 경사각이 고정된 태양전지 패널을 장착한 형태로 보급되고 있다. 일반적으로 부유체의 구조는 부유체만 단독으로, 또는 금속 지지대와 부유체가 결합된 형태로 만들 수 있다. 지지대 없이 부유체만으로 태양전지 패널을 지지하는 경우 부유체는 특수하게 디자인된다. 이러한 부유체 구조가 가장 일반적인 형태로, 여러 공급업체에서 취급하고 있으며, 전 세계적으로 수백 메가와트의 설치용량을 차지하고 있다. 또 다른 유형은 금속 지지대를 사용하여 지상 태양광과 유사한 방식으로 태양전지 패널을 지지하는 형태이다. 이 금속 지지대는 부력만 제공하는 폰툰에 고정되어 있다. 이 경우 특별히 디자인된 부유체가 필요하지 않다.

부유체는 일반적으로 연안, 수역 밑바닥, 말뚝 등에 고정시킬 수 있다. 사업자는 부유체의 위치, 수심, 토양 조건, 수위변동 등에 적합한 고정 장치 설계를 채택해야 한다. 작고 얇은 연못 같은 경우에는 연안에 고정

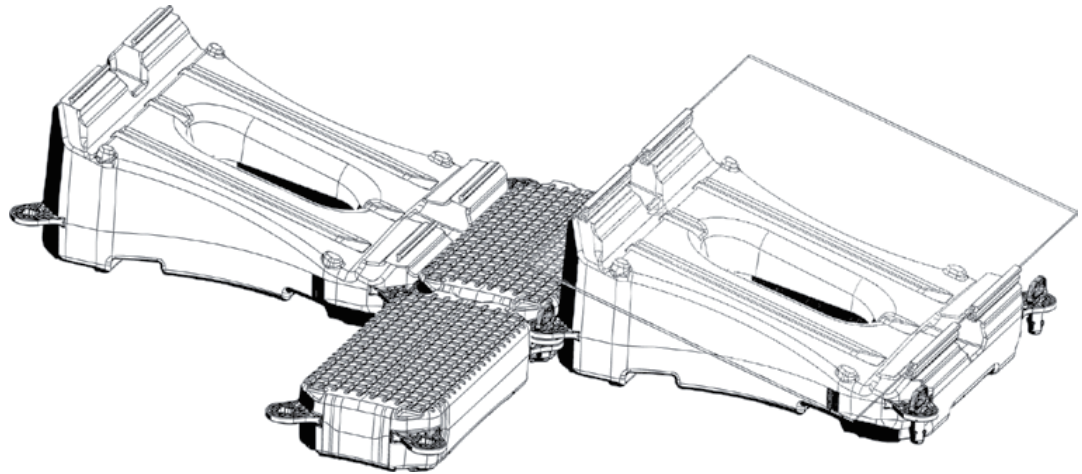
10) 육지와 가깝게 설치된 소규모 수상태양광의 경우 인버터를 육지에 설치하는 경우도 있다.

11) 이하의 기술적 내용은 World Bank(2019)를 참고하여 작성함.

12) pontoon-type

하는 방식도 적합하다. 하지만 대부분의 부유체는 수역 밑바닥에 고정시키는 방식으로 설치된다. 방식에 관계없이 고정 장치는 설치가 25년 이상 유지되도록 설계되어야 한다. 또한 주변 영향요인과 수위변동을 수용하기 위해 계류 라인을 적절하게 선택해야 한다.

그림 5 지지대가 없는 부유체의 디자인 예시



자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.33

그림 6 금속 지지대가 있는 부유체 예시



자료 : 스코트라 홈페이지

연구 및 실증 단계인 수상태양광 기술은 추적식, 집광형, 수중형(Submerged) 등이 있다. 추적식 수상태양광은 전체 부유체를 회전하여 동쪽에서 서쪽으로 태양의 위치를 따라갈 수 있다. 지상보다 수상에서 태양 전지 어레이를 이동하는 것이 저항이 낮아서 상대적으로 수상태양광에 적합하다고 볼 수 있다. 또한 태양의 위치와의 정렬이 완전히 정확할 필요는 없기 때문에 물결의 움직임으로 인한 교란은 사소한 영향을 준다. 부유체는 중앙 말뚝에 계류하거나, 고정된 외부링 또는 다각형으로 둘러쌀 수 있다. 일반적으로 부유체

는 직경이 최대 100m인 원형이며, 모터로 회전한다. [그림 7]은 한국수자원공사가 합천댐에 설치한(2013년 12월 준공) 100kW급 추적식 수상태양광 설비이다.

그림 7 합천댐 추적식 수상태양광



자료 : 국토매일, “친환경 추적식 수상태양광 합천댐에 첫선”, 2013. 12. 05.

집광형 태양광발전 설비는 주변 온도가 지상보다 더 낮고, 냉각수로 물을 쉽게 사용할 수 있는 수상에 설치하기에 적합하다. 수상 환경은 작동 온도가 높은 집광형 태양광발전 시스템에서 발생하는 일반적인 문제를 완화하는 데 도움이 된다. 물에서는 설비의 지속적인 움직임이 정확한 위치 제어를 방해하기 때문에 초고 집광은 불가능할 수 있다. 그러나 거울 또는 프레넬 렌즈를 사용하면 어느 정도의 집광력을 얻을 수 있다. 예를 들어, V자형 거울을 사용하여 빛을 수평 태양전지 패널에 집중시킬 수 있다. 집광형 수상태양광 시스템은 추적식과 자연스럽게 연계될 수 있다. 그런 경우 거울은 각 태양전지 패널 앞에 배치되고, 전체 부유체는 원형으로 회전하며 태양을 추적한다.

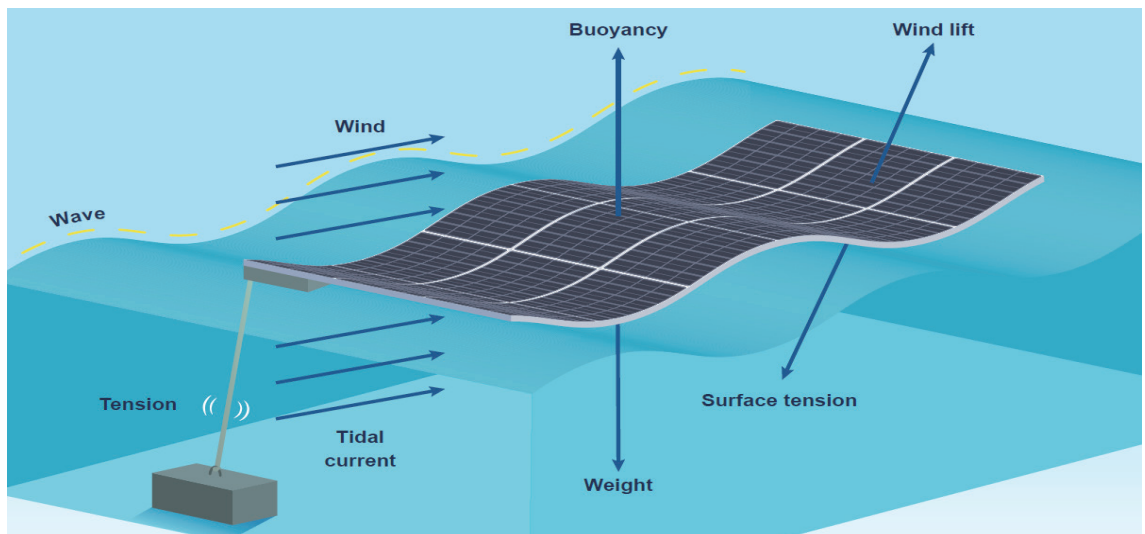
그림 8 집광형 수상태양광



자료 : The Sydney Morning Herald, Start-up Infratech's floating solar rafts hold promise for Australia's rural communities, 2015. 9. 1.

물의 냉각 특성을 활용하기 위해 태양전지 패널을 물과 직접 접촉시키면 작동 온도가 크게 낮아져 출력이 증가할 수 있다. 이를 위해 수면 바로 아래에 태양전지 모듈을 잠그거나 수면 위에 플렉서블 모듈을 띄울 수 있는데, 이것이 수중형 태양광이다. 낮은 모듈 온도 외에도, 수중형 태양광 시스템은 특히 바람, 물살 등에 의한 기계적 부하와 파동으로 인한 내부 응력을 줄여서 계류를 단순화하는 이점을 제공한다. 얇고 유연한 필름(결정질 실리콘 또는 기타 박막 재료로 만들어진) 형태의 태양전지 패널은 자체적으로 부력을 가진다. 이것은 일반적으로 내습성이 있으면서 공기층도 만드는 재료로 싸워져 있다. 필름 형태의 태양전지는 둥글게 말 수 있어서 쉽게 설치할 수 있고, 현장으로 쉽게 이동할 수 있다. 이렇게 부력을 자체 보유한 태양전지 모듈을 보급하기 위한 총 자재 사용량은 기존 태양전지 패널보다 훨씬 적다.

그림 9 수중형 태양광 시스템 개략도



자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.45

그림 10 수중형 태양광 시스템 설치사례



자료 : Trapani, K. and D.L. Millar, 2014., The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: The concept and development of the prototype, Renewable Energy 71: 43-50.

해상 태양광은 개념적으로 내륙 수역의 수상태양광과 유사하다. 그러나 해상의 환경은 다음과 같은 추가 과제와 장애요인을 야기한다. 우선 파도와 풍속이 해상에서 더 높기 때문에 수면 상태가 훨씬 더 불안정하다. 조석과 해류로 인해 계류 및 고정에 더욱 중요해진다. 더 강한 해수의 염도가 부품에 미치는 영향도 고려해야 한다. 또한 해상에서는 생물 오염 가능성이 훨씬 더 높아진다. 내륙 수역보다 까다로운 해상 환경에 의해 부과되는 부력, 고정 장치, 부품에 대한 더 엄격한 요구 사항은 기존과는 다른 부유체의 설계 또는 기술의 사용을 필요로 할 수 있다. 그러나 그동안의 해양 및 해양산업에서의 풍부한 경험을 통해 이러한 문제를 해결할 수 있을 것이다.

일반적인 해안지역에 비해서 석호 및 만과 같은 지역은 비교적 평온하므로 수상태양광 설치에 더 적합하다. 세계의 해안선을 따라 이러한 지역이 많이 있어 수상태양광에 대한 큰 보급잠재량을 제공한다. 또한 해상 태양광은 몰디브와 같은 작은 섬이 태양광 부지를 마련하기 위해 부족한 토지를 정리할 필요 없이 친환경 에너지로 전환할 수 있는 유일한 방법일 수 있다.

그림 11 해상 태양광 설치사례



자료 : The Edition, A sustainable stride towards a renewable future, 2019. 10. 23.

수상태양광의 부상은 수상태양광과 수력발전소를 결합하는 새롭고 유망한 대안을 제시한다. 즉시 조정 가능한 에너지원인 수력은 가변적인 태양광 전력에 대한 실시간 보완설비가 될 수 있는 잠재력을 가지고 있다. 수력발전 댐 뒤의 저수지는 조도가 높은 기간 동안 물을 저장하고 구름이 더 많거나 수요가 급증할 때 방출할 수 있으므로, 하이브리드 태양광 및 수력 발전소 운영에서 저장 시스템 역할을 한다.

저수지 수면을 이용하는 것 외에도, 이 조합은 수력발전소의 인프라를 통해 전력계통망 연결을 쉽게 하는 이점을 가진다. 이러한 방식은 새로운 댐 건설을 정당화하기보다는 기존 수력발전소의 유용성을 극대화하는 방법으로 고려될 것이다. 물론 지역과 같이 강우 패턴이 매우 계절적인 경우, 수력과 수상태양광의 결합

은 연중 상보성을 가진다. 건기 동안은 더 많은 태양광 전기가 생산되고(수위와 수력 출력이 낮은 경우), 장마철에는 그 반대가 된다. [그림 12]는 국내 최초로 발전용 저수지(청송양수발전소 하부담 저수지 청송호)에 설치한(2021년 3월 준공) 한국수력원자력의 수상태양광 발전소이다. 발전용량은 4.4MW이며, 저수지 면적의 약 5.7%를(29,450㎡) 모듈 설치에 활용했다.

그림 12 청송양수발전소 저수지 수상태양광



자료 : 한국수력원자력, 보도자료 “한국수력원자력, 국내 최초 발전용 저수지에 수상태양광 준공”, 2021. 4. 13.

4. 수상태양광 보급 현황 및 여건

2007년에 최초의 수상태양광이 일본 아이치현에서 연구용으로 설치되었다. 최초의 상업용 수상태양광은 2008년에 미국 캘리포니아주 파니엔테 와이너리에 설치된 175kW급 시스템이다. 이 시스템은 관개용 연못의 수면을 활용함으로써 포도 재배에 더 잘 활용될 수 있는 토지를 대체하였다. 이후 초기 수상태양광 설치사례에 대한 좋은 평가가 학계를 중심으로 퍼져나갔다. 2013년부터 1MW보다 큰 규모의 수상태양광 설비가 주로 일본, 한국, 중국 등지에서 등장하기 시작했다. 수상태양광에 대한 관심은 그 이후 급속도로 증가했다.

표 1 수상태양광의 주요 기술발전

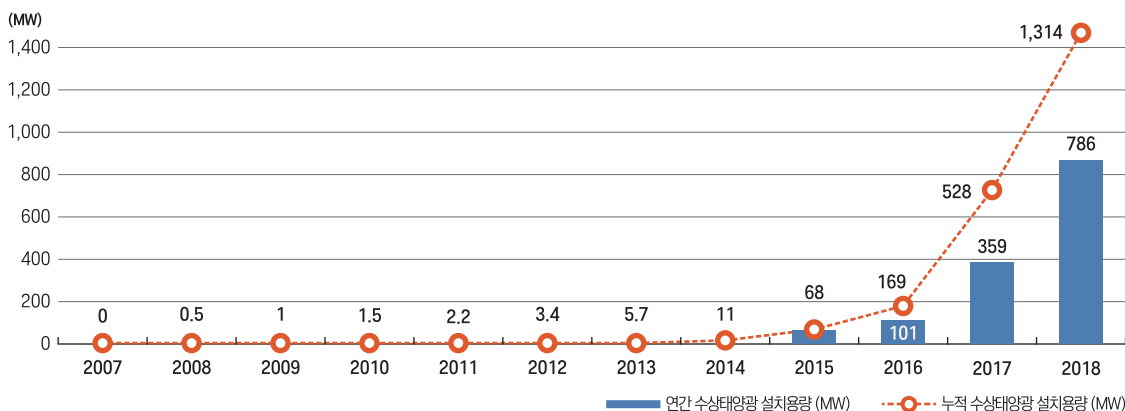
주요 기술발전	설치 내용	년도
최초의 수상태양광 설치	일본 아이치현, 20kW급	2007
최초의 상업용 수상태양광 설치	미국 파니엔테 와이너리, 175kW급	2008
최초의 추적식 수상태양광 설치	이탈리아 페트라 와이너리(회전 시스템), 200kW급	2010
최초의 메가와트급 수상태양광 설치	일본 사이타마현, 1,180kW급	2013
최초의 마이크로 인버터를 사용한 수상태양광 설치	일본 후쿠오카현, 300kW급	2016
최초의 수력발전 연계 수상태양광 설치	포르투갈 Alto Rabagão 댐, 220kW급	2017

자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.17

최근에는 대규모 수상태양광이 중국, 인도, 동남아시아를 비롯한 전 세계에서 설치 및 계획되고 있다. 중국 동부는 인구가 많고 가용 토지가 제한적이지만 수역이 풍부하다. 동남아시아에서 수상태양광은 메콩강 같은 기존 수력발전소와 연계할 경우 엄청난 추가 용량을 확보할 수 있다. 이처럼 새로운 시장이 계속 등장함에 따라 수상태양광 누적 설치용량이 빠르게 증가하고 있다.

세계적으로 설치된 수상태양광 발전용량은 2018년 12월 기준으로 1.3GW를 초과했으며, 2017년 이후 기하급수적으로 증가하고 있다.¹³⁾ 2019년 말 기준의 수상태양광 설치용량은 2.4GW로 추정된다.¹⁴⁾ 2020년 10월 기준으로는 전 세계에 3GW의 수상태양광이 설치된 것으로 추정된다. 또한 2025년까지 수상태양광 10GW가 신규 보급될 것으로 예상된다.¹⁵⁾

그림 13 전 세계 수상태양광 연간 및 누적 설치용량



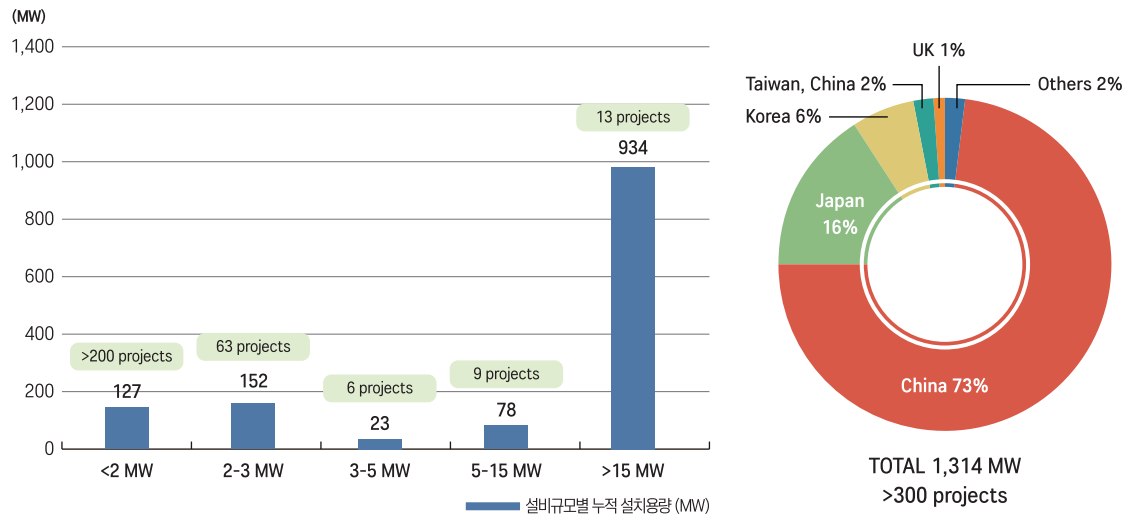
자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.17

13) 이상 World Bank(2019) 참고

14) 우드 맥킨지 추정치(Greentech Media 웹페이지)

15) Fitch Solutions 추정치(Recharge 웹페이지)

그림 14 수상태양광의 설비규모별 및 국가별 누적 보급 현황(2018년 12월 기준)



자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.58

12개 국가¹⁶⁾에 대한 블룸버그의 현황 리포트에¹⁷⁾ 의하면, 2021년 1월 기준으로 가동 및 추진 중인 수상태양광 용량은 약 15.5GW인 것으로 추정된다.¹⁸⁾ 한국과 중국이 이 중에서 합계용량 기준 최상위 2개 국가이며, 동일하게 약 3.7GW의 수상태양광 보급을 추진 중이거나 완료하였다. 한국에서 상업운전 중인 수상태양광은 총 115MW인 것으로 조사되었다. 중국은 1.4GW, 일본은 190MW, 베트남은 118MW의 수상태양광이 상업운전 중인 것으로 나타났다. 가동 및 추진 중인 물량을 모두 합해 1GW가 넘는 국가는 앞서 말한 한국, 중국 외에 태국, 베트남, 라오스 등 총 5개국이었다.

전 세계 인공저수지 수면적은 400,000km² 이상에 달한다. 이러한 6대륙 인공저수지 수면의 1%만 활용해도 수상태양광 용량은 400GW에 달할 수 있다. 이는 2017년 말의 총 태양광 설치용량 수준이다. 전 세계 인공저수지의 3분의 1에 대해서 표면적의 10%만 활용해도 수상태양광 시장은 테라와트(1,000GW) 규모의 잠재력을 가진다.

16) 대한민국, 중국, 태국, 베트남, 라오스, 인도, 대만, 그리스, 네덜란드, 일본, 필리핀, 인도네시아

17) BloombergNEF(2021.3.15.)

18) 이상의 보급 현황 추정치는 발표 기관별로 조금씩 차이가 있다.

표 2 세계 인공저수지에 대한 수상태양광 보급 잠재량

대륙	총 가용 수면적(km ²)	평가된 수역 수(개)	총 수상태양광 설치 잠재량 (GW)			총 수상태양광 연간발전량 잠재량 (GWh/y)		
			설치된 수면적 비율(%)			설치된 수면적 비율(%)		
			1%	5%	10%	1%	5%	10%
아프리카	101,130	724	101	506	1,011	167,165	835,824	1,671,648
아시아	115,621	2,041	116	578	1,156	128,691	643,456	1,286,911
유럽	20,424	1,082	20	102	204	19,574	97,868	195,736
북아메리카	126,017	2,248	126	630	1,260	140,815	704,076	1,408,153
오세아니아	4,991	254	5	25	50	6,713	33,565	67,131
남아메리카	36,271	299	36	181	363	58,151	290,753	581,507
합계	404,454	6,648	404	2,022	4,044	521,109	2,605,542	5,211,086

자료 : World Bank, Where Sun Meets Water, 2019., p.57

현재 수상태양광 보급용량이 상당한 국가에서도 사업의 허가와 관련된 명확하고 구체적인 규정이 없다. 대체로 지상 태양광과 유사하다고 가정하지만, 별도의 법적 해석이 필요하다. 일부 국가에서는 식수원용 저수지 또는 수력용 저수지가 국가보안시설로 간주되어 허가가 더욱 복잡하고 오래 걸린다. 수상태양광 보급은 대체로 비용경쟁력이 있을 것으로 예상되므로 특별한 재정지원이 반드시 필요하지는 않을 수도 있다. 그렇지만 사업 초기에는 수상태양광 기술에 대한 업계의 상대적으로 부족한 경험과 관련된 장벽을 극복하기 위해서 지원이 필요할 수 있다.

각국 정부가 수상태양광 보급을 지원하는 일반적인 방식은 현재 크게 두 가지 범주로 분류할 수 있다. 첫째는 재정지원이다. 대만과 중국에서는 수상태양광에 지상 태양광보다 높은 수준으로 발전차액지원을 하고 있다. 한국에서는 수상태양광일 경우에 일반부지나 임야에 태양광을 설치할 때보다 신재생에너지 공급인증서(REC) 가중치가 높다.¹⁹⁾ 미국 매사추세츠주는 특정 조건하의 수상태양광에 대해서 \$0.03/kWh의 위치 기반 보상금을 지급한다.²⁰⁾ 둘째는 정부의 지원정책이다. 한국, 대만, 중국은 재생에너지 보급목표를 상당히 높게 설정함으로써 간접적으로 수상태양광을 지원한다. 재생에너지 발전원 중에서 태양광이 가장 보급이 용이한 편이기 때문이다. 인도 케랄라주는 수상태양광 시범사업을 시행했다. 대만, 중국, 인도는 수상태양광 전용 입찰사업을 마련했다. 한국, 싱가포르, 네덜란드 등의 수역 관리기관들은 수상태양광 설치에 대한 임대계약 입찰을 여는 등 이 기술에 대해서 높은 수용성이 있었다.²¹⁾

19) 신 재생에너지센터 공고 제2021-8호, 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙, 2021년 4월 29일

20) The Solar Massachusetts Renewable Target (SMART) Program

21) 이상 World Bank(2019) 참고.

세계은행의 수상태양광 시장보고서에²²⁾ 따르면, 2018년에 수상태양광 시스템의 총 CAPEX는²³⁾ 위치, 수심, 수위변동, 용량에 따라서 와트(W)당 0.8~1.2달러로 나타났다.²⁴⁾ 수심이 깊은 저수지에 대한 대규모 사업은 개발 및 자본 비용을 증가시켜 가장 추진이 복잡한 편이다. 전문가에 따르면 최대 약 30MW의 사업에서 용량이 중요한 요소이며, 그 이상에서는 규모의 경제가 덜 중요해진다. 세전 기준으로 계산된 일반적인 50MW 수상태양광 시스템의 LCOE는²⁵⁾ 지상 시스템과 큰 차이가 나지 않았다.²⁶⁾ 수상태양광의 지상 태양광보다 더 많은 초기 자본 지출은 지상 태양광보다 개선된 발전량과 균형을 이루었다.

5. 국내 보급 관련 이슈

수상태양광의 국내 보급은 저수지와 댐의 관리기관인 농어촌공사, 수자원공사와 발전자회사를 중심으로 이루어졌다. 블룸버그 리포트에²⁷⁾ 따르면 2021년 1월 기준으로 총 115MW의 수상태양광이 상업운전 중이다. 이 외에도 추진이 발표된 수상태양광 발전용량은 총 668MW이고, 자금이 확보된 사업은 총 51MW이다. 허가된 수상태양광 사업의 발전용량은 2,905MW이다. 이렇게 추진 중이거나 가동 중인 용량을 모두 합하면 3,739MW가 된다.

표 3 수자원공사(댐) 3개소 총 5.9MW 사례

합천댐 수상태양광	보령댐 수상태양광	청풍호(충주댐) 수상태양광
최초 실증 100kW ('11.10) 최초 상용화 500kW ('12.07) 추적식 100kW ('13.12)	2MW('15.12)	3MW('17.12), 200kW('18.06)
		

자료 : 한국수자원공사 보도자료(2012, 2016, 2017)

22) World Bank(2019)

23) 자본적 지출이라고도 하며 미래의 이윤 창출, 가치의 취득을 위해 지출된 투자 과정에서 비용을 말함(기획재정부 시사경제용어사전).

24) 주로 보도자료에서 검색한 수상태양광 투자비용에 대한 정보를 세계은행 보고서의 저자가 취합함.

25) 균등화발전비용(levelized cost of electricity)

26) 세계은행 보고서에서 기준사례(50MW)의 수상태양광 LCOE는 7.11 \$cents/kWh, 지상 태양광은 6.85 \$cents/kWh이었음.

27) BloombergNEF(2021.3.15.)



수상태양광의 보급에 있어서 주요 이슈는 수환경 유해성 여부와 주민 수용성 문제, 이 두 가지이다. 이해 관계자들이 수상태양광 설비로부터 수역에 중금속과 유해물질이 녹아 나올 것이고, 수질도 악화될 것이라는 우려를 표시하는 경우가 있었다. 이에 대해 한국환경정책평가연구원의 연구진은 합천호 수상태양광에 대해서 4차례의 분석을 실시한 결과 수질에 악영향은 사실상 없다는 결론을 내렸다.²⁸⁾ 또한 수상태양광 설비에는 중금속이 함유되지 않았기 때문에, 대조 검사 결과에서도 관련 영향이 없었다고 발표했다. 그렇지만 이는 수자원공사가 선별된 기자재를 사용한 결과이니, 타 사업자도 중금속 미포함 자재를 사용하게 하는 제도가 필요하다는 의견을 제시했다. 합천호 수상태양광 설비에 대한 유해물질 용출 실험 결과는 대부분 불검출이었고, 일부 검출된 항목은 기준치 이하였다. 관련한 문제 제기에 대하여 환경부도 ‘수도용 자재 위생안전기준’ 적합 제품만 수상태양광 기자재로 사용하고 있다고 발표하며 안전성을 강조하였다.²⁹⁾ 수상태양광 부지 인근의 주민들은 종종 발전소가 수변 경관을 해친다며 우려하기도 한다. 앞서 살펴본 수환경 문제는 시험검사로 해소될 수 있는 이슈이다. 하지만 이러한 주민 수용성 문제는 여러 의견을 수렴해야 하므로 해결이 쉽지 않다. 수상태양광의 주민 수용성에 대해서 한국농촌경제연구원이 2021년 2월에 온라인조사를 진행한 바 있다.³⁰⁾ 문항 중 “거주하고 있는 인근 지역 저수지, 댐 등에 설치 여부”에서 응답자의 51.8%가 동의한다고 응답하였고, 29%가 동의하지 않는다고 응답했다. 19.2%는 보통이라고 응답했다. “지역주민의 경제활동을 침해하거나 경관에 영향을 주지 않는 저수지에 설치 여부”에는 63.7%가 동의한다고

28) 노태호·이후승(2019.9.30.), “발전시설 주변 및 직하부의 수질 및 수환경 측정값은 대조지점의 측정치와 유의미한 차이가 없음.”

29) 환경부, 보도자료 “수상태양광, 안전하게 설치·운영”, 대한민국 정책브리핑(www.korea.kr), 2021. 3. 4.

30) 한국농촌경제연구원(2021.3.12.)

응답했고, 18.7%가 동의하지 않는다고 답했다. 보통이라는 의견은 17.6%였다. 이 사례에서 응답자 본인의 거주지역에 대해서는 약 30%가 수상태양광 설치반대 입장을 갖는다는 점에 주목해야 한다.

주민 수용성 문제에서는 주민들이 반대하는 주된 이유를 해결하거나, 다른 인센티브를 제공해 만족시키는 것이 주된 과제가 될 것이다. 산업통상자원부의 보도자료에 따르면, 새만금 수상태양광 발전사업의 경우 4차례 주민설명회(군산시, 김제시, 부안군, 전주시) 및 4차례 민관협의회를 통해 지역주민과의 합의(2019년 5월)를 이끌어냈다. 이에 새만금 수상태양광 관련 지역주민은 전체의 약 30%의 사업에 대해 채권 등으로 참여하여 이익을 공유(수익률 7%)한다.³¹⁾ 보령댐 수상태양광의 경우 합천댐 수상태양광에서 환경오염이 없었음을 주민들에게 지속 설명하여 지역주민들의 우려를 해소하였다. 또한 지역주민, 지자체, 사업자, 시민단체 등으로 구성된 발전시설 운용 협의체를 구성·운영하며 관련 정보를 공개하였다. 그리고 발전소 주변지역 지원사업을 통해 지역사회와 이익을 공유하기 위해서 최초 8천여만 원을 지원한 후 매년 2천만 원을 지원 중(학생 장학금, 마을시설 개선사업 등)이다.³²⁾

앞서 설명한 청송양수 수상태양광발전소 관련하여 한국수력원자력은 환경 보전방안을 마련했으며 향후 10년 이상 환경 모니터링을 할 예정이다. 또한 한수원은 발전소 인근 망향의동산을 재정비하고, 포토존과 전망대를 설치해 관광자원으로 활용할 수 있도록 조성하는 등 지자체와 상생·협력을 위해 노력했다.³³⁾ 한국수자원공사는 2021년 준공 예정인 합천댐 41MW 수상태양광사업에서 설비 공사 인력을 지역에서 우선 고용했으며, 완공 후 약 20년 동안의 유지보수 인력도 지역주민을 채용할 계획이다. 그리고 지역주민이 투자자로 참여 시 향후 20년간 4~10%의 고정 이자수익을 참여율에 따라 배분받게 하였다.³⁴⁾

6. 시사점

태양광은 순수하게 발전 단계만 보았을 때 전기 외에는 어떤 물질도 설비 외부로 배출하지 않는 것으로 보인다. 물론 태양광 발전설비(소재, 부품)의 생산, 수명 도달 후 폐기 단계에서는 분명 에너지를 소비해 온실가스를 배출시킬 것이고 산업폐기물을 발생시킬 것이다. 그렇지만 설비의 생산과 폐기는 단기간인 반면에 태양광 발전 모듈의 출력 보증 기간은 통상 25년이다. 25년 이상 장기간 유해한 물질 배출이 거의 없이 전기를 생산하는 태양광은 친환경성에 있어서 가동 내내 온실가스와 핵폐기물을 발생시키는 화력, 원자력과 비교 불가하다.

그럼에도 불구하고 태양광은 여러 측면에서 거센 비판을 받아왔다. 필수재인 전기요금은 낮을수록 국민에게 이익인데 화력, 원자력에 비해 태양광은 경제성이 나쁘다는 점이 가장 많이 지적되었다. 이 외에 태양광이 우리나라 기후에는 적합하지 않다는 지적, 인구대비 작은 영토 내 태양광의 토지 및 산지 점유 필요성

31) 산업통상자원부, 보도자료 “역대 세계최대 수상태양광 사업, 새만금에서 본격 추진”, 2019. 7. 18.

32) 산업통상자원부, 보도자료 “충남·충북·대전지역 신재생에너지 정책 순회 협의회 개최”, 2019. 12. 5.

33) 한국수력원자력, 보도자료 “한국수력원자력, 국내 최초 발전용 저수지에 수상태양광 준공”, 2021. 4. 13.

34) 한국수자원공사, 보도자료 “국내 최대규모 수상태양광 사업, 주민참여형으로 추진”, 2020. 12. 22.

에 대한 지적 등이 있었다. 이 중에서 경제성과 우리나라 기후 적합성 문제는 기술개발로 상당 부분 해결이 가능하며, 그렇기에 그동안 지속적으로 개선되어 왔다.

‘왜 태양광이 그 토지를 차지해야 하는가?’, ‘토지 점유 면적 대비 발전량을 고려할 때 생산효율성이 너무 낮지는 않은가?’하는 비판은 기술발전이 해결에 일부 도움을 줄 수 있겠지만 주된 해결책은 되어 줄 수 없는 문제다. 바로 여기에서 수상태양광이 왜 최근 몇 년간 전 세계에서 기하급수적으로 보급되었는지 그 이유를 알 수 있다. 국민의 생활과 생산활동은 토지 위에서 이루어지는데, 수상태양광은 이러한 활동 장소와 충돌하지 않는다. 일부 수상태양광 설치수역에서 활동하는 어업 종사자가 있을 수 있겠지만, 전 세계적으로 어업은 대체로 해상에서 이루어진다. 또한 수면적이 아주 넓은 수역에서는 수상태양광 설비면적이 극히 일부에 불과할 것이기 때문에 어업활동에 별다른 영향을 주지 않을 것이다.

수상태양광이라는 새로운 태양광 보급 옵션이 생기자마자, 전 세계의 정부와 사업자들이 적극적으로 보급에 나서면서 시장이 매우 빠르게 성장하고 있다. 최초 설치가 2007년인 비교적 최신 기술이지만, 전 세계 수상태양광 보급량이 벌써 3GW를 넘어섰다. 심지어 수상태양광은 태양전지 모듈 냉각 환경을 갖추고 있어서 지상 태양광보다 발전량도 많다. 중국에서 100MW 이상의 대규모 수상태양광이 원활하게 운영되는 것으로 보아 현재 수상태양광 보급에서 기술적인 문제는 대부분 해결되어 있는 것으로 판단된다.

그동안의 지상 태양광 보급이 태양광 분야의 기술 성숙도를 상당히 높여 주었다. 수상태양광은 전기설비 측면에서 지상 태양광과 유사하다. 단지 수상이라는 조건에 따라 부유체, 고정 및 계류장치 등이 추가될 뿐이다. 수상태양광은 지상 태양광의 기술발전 결과를 누리면서 부지 문제를 해결한 업그레이드된 태양광 시스템이라고 볼 수 있다. 기후변화로 인해 녹지가 더욱 소중해졌고, 동시에 비연소 재생에너지인 태양광도 보다 소중해졌다. 수상태양광은 기후변화가 더욱 위협적으로 가속화되는 현시점에서 녹지보전과 에너지전환을 모두 얻게 해줄 대안이다.

이러한 수상태양광 보급을 위해 해결해야 할 주된 과제는 주민 수용성 확보일 것이다. 이를 위해서 중앙정부와 지자체, 사업자는 수상태양광 사업에서 발생하는 이익의 일부를 주민들과 공유할 방안을 마련해 주민들에게 제안하는 것이 바람직하겠다. 주민 선호도를 높이기 위해서, 미관을 고려해 시스템 외관을 디자인하거나 야간 경관 조명, 분수 등을 설비에 추가하는 것도 고려할 수 있을 것이다. 전체 수면적 중 수상태양광 설비 사용비율을 주민과 협의하여 정하는 것도 검토해 볼 필요가 있다. 그리고 예상 발전수익의 일정 비율을 인근지역 지원사업에 사용하는 것도 바람직하겠다.

최근의 인터뷰에서 국내 RPS 대상업체는 태양광이 가장 보급이 쉽지만 대규모 설치 부지가 없는 것이 문제라는 의견을 밝혔다. 이처럼 최근에 수상태양광이 종종 보급되고는 있지만, 여전히 수상태양광은 지상태양광보다 접근이 쉽지 않은 대안이다. 정부는 수면 사용허가, 자금조달 등 수상태양광 보급의 장애요인을 파악하고, 해결을 지원해서 태양광 보급목표 달성에 수상태양광을 활용해야 하겠다. 또한 정부는 수상태양광이 심한 홍수와 가뭄에도 정상 가동이 가능한 기술형식으로 보급되도록 관리해야 할 것이다.

국내 문헌

- 국토매일, “친환경 추적식 수상태양광 합천댐에 첫선”, 2013. 12. 05.
- 노태호·이후승, 수상태양광 발전사업 쟁점의 허와 실 - 팩트체크, 한국환경정책평가연구원, KET 포커스 제7권 제9호(통권 제52호), 2019. 9. 30.
- 산업통상자원부, 보도자료 “역대 세계최대 수상태양광 사업, 새만금에서 본격 추진”, 2019. 7. 18.
- 산업통상자원부, 보도자료 “충남·충북·대전지역 신재생에너지 정책 순회 협의회 개최”, 2019. 12. 5.
- 신·재생에너지센터 공고 제2021-8호, 공급인증서 발급 및 거래시장 운영에 관한 규칙, 2021년 4월 29일
- 전력거래소, 2019년도 발전설비현황, 2020. 7.
- 한국농촌경제연구원, 수상태양광 발전사업에 대한 농업인들의 생각은?, KREI 조사리포트 [제3호], 2021. 3. 12.
- 한국수력원자력, 보도자료 “한국수력원자력, 국내 최초 발전용 저수지에 수상태양광 준공”, 2021. 4. 13.
- 한국수자원공사, 보도자료 “국내 최대규모 수상태양광 사업, 주민참여형으로 추진”, 2020. 12. 22.
- 한국수자원공사, 보도자료 “녹색기술의 새로운 개척, 수상태양광발전 사업화 성공”, 2012. 7. 30.
- 한국수자원공사, 보도자료 “K-water, 보령댐 수면에 친환경 태양광 발전소 준공”, 2016. 2. 24.
- 한국수자원공사, 보도자료 “K-water, 충주댐(청풍호)에 수상 태양광발전소 준공”, 2017. 12. 20.
- 한국수자원공사, 수상태양광 발전 시스템 실용화를 위한 ICT 융합기술 개발(3차년도), 2014. 12.
- 한국전기안전공사, 태양광 발전설비 점검 지침, 2018년 9월 20일 제정
- 한국중부발전, 보도자료 “한국중부발전-탑인프라, 국내 최대 수상태양광 발전소 언택트 온라인 준공식 거행”, 2020. 11. 30.
- 환경부, 보도자료 “수상태양광, 안전하게 설치·운영”, 대한민국 정책브리핑(www.korea.kr), 2021. 3. 4.

외국 문헌

- BloombergNEF, High Land Prices Hinder Solar Power in South Korea, 2021. 3. 15.
- Choi, Y.-K., and N.-H. Lee. 2013, “Empirical Research on the Efficiency of Floating PV Systems Compared with Overland PV Systems.” CES-CUBE 25: 284-9.
- Liu, H., V. Krishna, J. L. Leung, T. Reindl, and L. Zhao, 2018. “Field Experience and Performance Analysis of Floating PV Technologies in the Tropics.” Progress in Photovoltaics: Research and Applications 26 (12): 955-1012.
- The Edition, A sustainable stride towards a renewable future, 2019. 10. 23.
- The Sydney Morning Herald, Start-up Infratech's floating solar rafts hold promise for Australia's rural communities, 2015. 9. 1.
- Trapani, K. and D.L. Millar, 2014., The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: The concept and development of the prototype. Renewable Energy 71: 43-50.
- Trapani, K. and M. Redon Santafe, 2015., “A Review of Floating Photovoltaic Installations: 2007-013.” Progress in Photovoltaics: Research and Applications 23 (4): 524-32.
- World Bank, Where Sun Meets Water, 2019.

웹사이트

- 기획재정부 시사경제용어사전, <https://www.econedu.go.kr/mec/ots/brd/list.do?mnuBaselId=MNU0000124&tplSer=4>
- 대한건축학회 건축용어사전, <http://dict.aik.or.kr/>
- 스코트라 홈페이지, http://scotra.co.kr/sub/introduction/portfolio.asp?mode=view&bid=1&s_type=&s_keyword=&s_cate=&idx=129&page=4
- ESMAP 웹사이트, https://www.esmap.org/where_sun_meets_water_floating_solar_market_report
- Greentech Media 웹사이트, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/the-state-of-floating-solar-bigger-projects-and-climbing-capacity>
- Recharge 웹사이트, <https://www.rechargenews.com/transition/floating-solar-going-global-with-10gw-more-by-2025-fitch/2-1-894336>