

밸러스트 수 이동으로 태양을 추적하는 부유식 태양광 발전시스템 개발

오정근¹·김준호¹·김승섭²·김효철³·류재문^{4,†}
군산대학교 조선해양공학과¹
(주)더블유솔라²
서울대학교 조선해양공학과·서울대학교 공학연구원³
충남대학교 선박해양공학과⁴

Note on the Development of Ballast Water Shifting System for Solar Tracking of the Floating Photovoltaic Plant

Jungkeun Oh¹·Jun-Ho Kim¹·Seung-Sup Kim²·Hyo-chul Kim³·Jae-Moon Lew^{4,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Kunsan National University¹
W SOLAR CO. LTD.²

Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University · Institute of Engineering Research³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University⁴

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The most powerful energy resource in nature is solar energy which becomes directly converted to electric power in worldwide. Most of the photovoltaic power plants are commonly installed on sunny side of the ground. Thus the installation of photovoltaic power plant could produce an unexpected adverse effect by sacrificing the productivity from green field or forest. To avoid these adverse effect floating photovoltaic plant has been devised and installed on inland reservoir. The photovoltaic plant could utilize ignored water surface without sacrificing the productivity of the ground. Additionally the photovoltaic efficiency has been reinforced by the cooling effect induced by the circulating air flow from water surface. The floating photovoltaic plant could be furnished solar tracking ability by tilting the system operated with the aid of the ballast system. This report is provided to introduce the design of the floating structure with solar panel which furnished solar tracking ability with the aid of ballast system.

Keywords : Floating photovoltaic plant(부유식 태양광 발전 시스템), Solar tracking(태양 추적), Ballast water(밸러스트 수)

1. 서 언

지구온난화로 인하여 탄소배출을 줄이는 문제가 세계적 관심의 대상이 되면서 강력한 불변의 자원인 태양광을 이용하는 문제가 주요한 과제로 대두되고 있다. 태양광 발전시스템은 일조량 확보가 일차적 조건이므로 사막이나 초지와 같은 지리적 조건을 활용하는 것이 유리하다. 이에 대하여 호수나 하천과 같은 수면 상에 설치하는 경우에는 육상에 설치할 때 반드시 필요한 부지 조성과 기초공사 등과 같은 부대 공사가 줄어들며 임목벌채와 같은 환경을 저해하는 공사가 불필요하게 된다. 또한, 태양광 발전 시스템을 수면 상에 설치하면 태양 전지판이 수면에서 일어나는 자연대류현상으로 인한 냉각효과가 있어서 발전효율이 높아지는 이점이 있다.

(Choi, et al., 2013; 2014; Trapani, 2013)

부유식 발전시스템 (Kim, 2011; Lee, 2011)의 규모는 시스템 생산과 설치수역으로의 운송 및 설치, 유지 보수를 운용상의 편익을 고려하여 설계하여야 한다. 또한 수역의 수심변화나 흐름의 유무 등을 고려하여야 하며 태풍 등의 바람 영향을 함께 고려하여 설계하여야 한다. 그리고 설계된 단위 시스템들은 집단화하여 경제성을 갖춘 대단위발전시스템으로 구축할 수 있어야 한다. 태양광 발전 시스템은 효과적으로 계류 고정하는 기술이 필요하게 된다. 태양광 발전시스템은 고정위치에 계류된 상태에서 밸러스트 수의 적재만으로 태양 전지판이 항상 태양을 향하도록 제어하는 것이 가능하다. 이때 부유체는 강한 바람을 받더라도 충분한 복원 안정성을 가져야 하는 동시에 최소한의 밸러스트 수를 사용하여

필요로 하는 자세제어가 가능하여야 한다.

이와 같은 배경에서 10kW 급 태양광 발전 단위제품을 설계, 제작하였다. 개발된 시스템은 경기도 군포시 둔대동에 소재한 반월저수지에 설치 운용하며 성능시험을 시행하였다. 시험을 통하여 부유체의 설계와 제작, 운송 및 설치, 복원안정성, 밸러스트 수 이용 태양추적, 태양광 발전에 미치는 태양추적의 효과 등을 조사한 바 있다. 앞으로 발전시스템의 집단체에 앞서서 부유식 태양광 발전시스템의 설계와 태양추적 기술에 관련된 부분을 정리하여 소개하고자 한다.

2. 부유체의 설계 및 제작

국내에 공급되고 있는 태양전지판을 적정하게 배치하여 10kW 용량의 태양광발전시스템을 수용할 수 있는 시험용 발전시스템을 설계, 제작하는 것을 일차적인 목표로 설정하였다. 시험용 발전시스템은 주 부력통이 수면 하에 잠겨 있고 이와 연결된 수직 기둥과 8개의 방사상으로 뻗쳐진 8개의 경사 기둥으로 밸러스트 탱크와 집광판을 받쳐주는 구조가 되며 이는 마치 보석 받침 장식과 같은 구조가 되므로 시스템을 Sundancer-Diamond 라 칭하였다. 이 시스템은 정상적인 직립 상태에서 충분한 복원력을 확보해야하고 최소한의 밸러스트 수를 이동시켜 원하는 방향으로 경사시킬 수 있는 동시에 경사상태에서도 적절한 복원안정성을 유지할 수 있어야 한다. 부유체의 설계하중을 산정하기 위해서는 바람, 물의 유속 등이 고려되어야 하나 본 논문에서는 유속이 거의 없는 반월저수지에 설치하였으므로 유속을 무시하였고 풍속에 대해서는 소극적으로 순응하도록 하여 부유체의 복원성 확보에 중점을 두었다. 첫째, 집광판을 배치하며 일부 위치에는 의도적으로 집광판을 배치하지 않아 바람이 빠지도록 하여 과도한 풍압이 걸리지 않도록 하였고, 둘째, 나머지 중 일부 집광판은 일정 이상의 풍압이 걸리면 힌지를 중심으로 회전 하여 자동으로 열리도록 함으로써 풍압 상승을 억제 하도록 설계하였다. 셋째, 기상 예보 등에 의하여 과도한 풍압 발생 소지가 있을 경우에는 경사조절용 밸러스트 수를 주 밸러스트 탱크로 보내고 추가의 밸러스트 수를 적재하여 집광판이 정수면에 수평하게 놓이도록 제어하고 중량중심 하강으로 인하여 GM의 상승이 이루어 지도록 하여 안전성을 제고하였다.

2.1 형상 요구조건

2.1.1 태양광 집광판의 치수

시중에 공급되고 있는 태양전지의 제품에 따라 차이가 있으나 대체로 태양전지판의 단위면적당 발전량은 150 w/m² 정도이며 제품 중량은 12.5 kg/m² 정도인 것이 공급되고 있다. 이를 바탕으로 하면 목표용량인 10kW를 위한 집광면적은 66.7 m² 이상이 되어야 한다. 따라서 규격품으로 제조 공급되는 태양전지판의 형상과 발전시스템의 경사상태에서의 최소 건현을 고려하여 맞변 거리가 10m 인 8각형 집광판 평면에 태양전지판을 배치하였다. 즉 폭 990mm 이고 길이가 1650mm인 전지판을 선택하면 40개

의 태양전지판을 배치하였을 때 하나의 전지판에서 250Watt의 전력을 얻을 수 있으므로 10,000Watt의 발전을 기대 할 수 있다. 이를 10kW 발전시스템이라 칭하기로 한다.

2.1.2 태양전지판의 중량

하나의 태양전지판의 중량은 18.5kg 정도이고 볼트 너트 등의 고정구와 전선 등의 중량을 고려하여 하나의 태양전지판을 설치 하는데 소요중량을 25kg이라 가정하면 태양전지판의 설치 중량은 1000kg 정도가 된다.

2.1.3 태양전지판의 경사범위

태양의 고도는 지구상 위도와 계절과 시간에 따라 변화하며 태양전지판은 태양광에 직교하는 방향으로 놓여야 효율이 최대가 되므로 경사각은 비교적 쉽게 계산된다. 즉, 부유식 태양광 발전시스템을 설치하는 구역의 위도와 발전 일시를 확인하면 임의의 순간에 필요로 하는 경사각을 쉽게 구할 수 있다. 예를 들어, 설치 지역의 위도를 37.5°라고 가정하면 태양의 남중고도가 하지는는 76°이고 동지에는 29°에 해당한다. 따라서 집광판의 기울기는 계절에 따라서 하지일 때 14°로부터 동지일 때 61°까지의 사이에서 변화하여야 한다. 한편으로 최대 61°까지 경사되더라도 복원안정성을 가지는 한편 집광판이 물에 잠기지 않도록 하는 최소 건현이 요구 된다. 이들 조건을 모두 충족시키려면 경사각을 감축하며 적절한 중간 값을 선정하는 것이 바람직하다.

2.1.4 부유체의 운동특징

부유체는 부유 상태에서 위치변화를 일으키지 않으며 자유롭게 회전할 수 있어야하지만 불필요한 각 회전은 억제되어야 한다. 동시에 태양전지판은 자유롭게 임의방향으로 경사를 조절할 수 있어야만 태양을 추적할 수 있다. 또한 파도로 인한 상하동요가 최소한으로 일어나는 구조이어야 하는 동시에 부유체가 회전하거나 경사하더라도 효과적으로 수면 근처에서 계류할 수 있어야 한다. 수면근처에서 계류하였을 때 계류위치와 경사중심위치의 차이가 있고 계류식에는 장력이 걸리더라도 태양 추적에 따르는 부유체 운동이 간섭을 일으키지 않아야 한다.

2.1.5 부유체의 복원특성

부유체는 폭풍 등의 예기치 못한 큰 경사외력이 작용하더라도 복원안정성을 가져야 하므로 큰 복원력이 요구된다. 다른 한편으로 부유체를 밸러스트 수로 경사시키려면 복원력이 작을수록 필요한 밸러스트 수가 적어져서 유리하다. 따라서 밸러스트 수의 적재 위치가 중심으로부터 멀리 떨어질수록 유리하다. 또 경사에 대하여 중심위치의 이동이 커야 복원력증가가 빠르게 나타나므로 부유체의 측면은 경사질수록 유리하다.

2.2 부유체의 형상결정

2.2.1 부유체의 탑재중량

부유체에 적재되는 중량은 앞에서 언급한 바와 같이 고정구를 포함한 태양전지판의 중량이 약 1,000kg 이고 추가로 밸러스트 배관, 펌프 및 각종 센서 등의 의장품 중량을 500kg 정도로 생각하면 탑재해야하는 중량은 1500kg 정도로 추정할 수 있다.

2.2.2 집광판의 형상

집광판에 40개의 250Watt 출력의 태양전지판을 배치하면 Fig. 1과 같은 배치를 생각할 수 있다. 여기서 일부 구간에는 집광판을 배치하지 않고 비워두었는데 이는 과도한 풍압이 걸리는 것을 피하기 위하여 개방한 것이다.

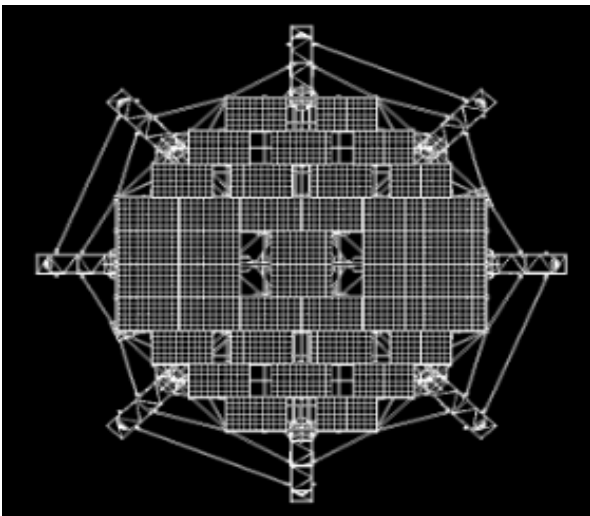


Fig. 1 Arrangement of 10kW class photovoltaic panel

2.2.3 경사각과 건현의 결정

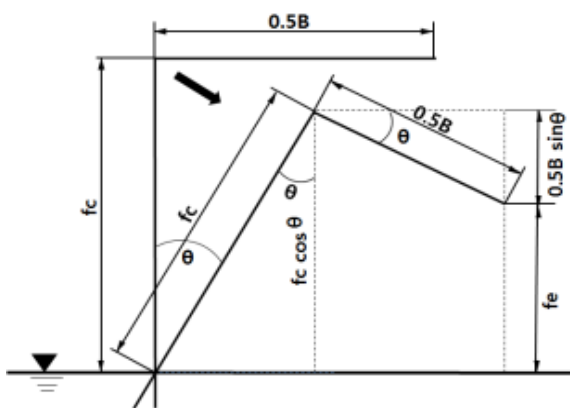


Fig. 2 Schematic relation of freeboard and inclination angle

Fig. 1에 보인 8각형 집광판의 맞변 거리가 약 10 m 이므로 이 판이 태양추적을 위하여 경사되었을 때 태양 전지판이 수면으로부터 200mm의 최소 건현이 필요하다고 생각하면 최대 경사각은 Fig. 2와 식 (1)로 표현한 바와 같이 간단한 관계로 구할 수 있다.

$$f_e = f_c \cos \theta - 0.5B \sin \theta \quad (1)$$

이 식에서 f_e 는 경사진 집광판의 최소 건현이고 f_c 는 집광판의 직립 상태에서의 건현이며, B는 8각형 집광판의 맞변거리이다. 따라서 다음과 같은 간단한 관계가 성립한다.

$$\sin \theta = \frac{-f_e B \pm f_c \sqrt{B^2 + 4f_c^2 - 4f_e^2}}{2(B^2/4 + f_c^2)} \quad (2)$$

$$\cos \theta = \frac{2f_c f_e \pm (B/2) \sqrt{B^2 + 4f_c^2 - 4f_e^2}}{2(B^2/4 + f_c^2)}$$

부유체가 부면심을 중심으로 경사를 일으킨다고 가정하고 최소건현을 200mm로 할 때 식 (2)를 사용하여 직립상태의 건현과 경사각의 관계를 조사하면 Table 1의 결과를 얻을 수 있다.

Table 1 Freeboard and maximum allowable tilting angle

Freeboard (m)	Tilting angle (degree)
2	19.67
2.5	24.51
3	29.00
3.5	33.11
4	36.87
4.5	40.28
5	43.38

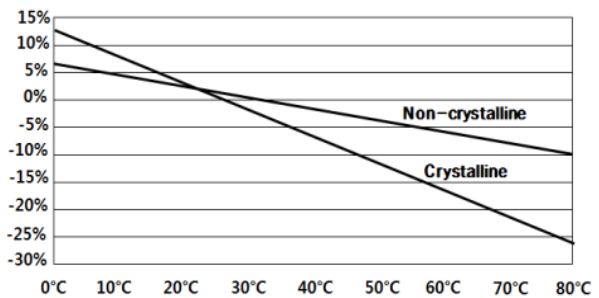


Fig. 3 Photovoltaic efficiency variation from datum temperature

태양 전지판의 최대 경사각은 하지에 14°로부터 시작하여 동지에 61°까지 변화할 수 있으나 연평균을 생각하면 춘분 추분에 평균경사각을 가져야 함으로 37.5°의 경사각을 표준으로 설정하면 건현은 4.1m로 결정 할 수 있다. 하절기에는 제어에 필요한 경사각의 범위가 이 표준 값보다 작아 최대효율을 얻을 수 있다. 추분으로부터 춘분에 이르는 기간 중에는 경사각이 모자라서 발전량의 감소가 나타나며 동지에 이르러서는 최대 8.3%의 출력저하가 기대 된다. 하지만 동절기에는 태양전지판의 온도가 떨어지는데 따르는 효율상승이 기대된다. 즉 Fig. 3과 같이 태양전지판의 온도를 춘분, 추분에 25°C 정도가 된다고 가정하였을 때 전지

판의 평균온도가 0°C까지 떨어지면 25°C일 때에 비하여 비정질 전지판인 경우 7%의 효율상승이 기대되고 결정질 전지판에서는 13%에 이르는 효율상승이 기대된다. 이와 같은 보상작용으로 동절기에 태양전지판의 최대경사각을 줄이더라도 발전효율에 미치는 영향을 무시 할 수 있을 것으로 기대된다.

2.2.4 부유체의 형상

부유체는 시스템과 구조 부재의 중량과 필요한 밸러스트 수를 적재한 상태에서 수면 상으로 부양 시킬 수 있는 충분한 부력을 가져야한다. 태양을 추적하며 임의의 방향으로 자유롭게 경사할 수 있어야 하므로 회전대칭형 형상인 것이 유리하다. 또 파랑 등으로 인한 상하동요가 작은 것이 유리하다. 따라서 부유체의 배수량의 대부분을 수면 아래로 잠기는 큰 직경의 주 부력통이 담당하고 수면을 관통하며 상부구조를 연결하는 정사각형 관으로 이루어진 스퍼부이(spar buoy) 형태를 기본형으로 하였다. 스퍼부이는 저수지등의 내수면에서 발생되는 파랑에 대하여서는 운동을 최소화 할 수 있고 하부의 부력통에 밸러스트 수를 탑재하여 복원력을 확보할 수 있다. 다른 한편으로 수면을 관통하는 수선면적이 작아 복원력이 작아져 적은 밸러스트 수 이동으로도 큰 경사를 유발시킬 수 있다.

앞에서 8각형 집광판에 태양전지판을 배치하였으므로 이를 지지 하기 위한 8개의 보조 기둥을 갖도록 설계하였다. 이 8개의 기둥의 아래쪽은 주 부력통과 연결되며 상단부는 집광판의 테두리 부분과 연결하도록 계획하였다. 이들 보조기둥들은 비갈쪽으로 경사하며 부유체와 연결된다. 부유체가 경사를 일으키면 물 밖으로 나오는 보조기둥에서의 부력 손실은 작고 잠기는 보조기둥에서 얻어지는 부력은 상대적으로 크다. 따라서 민감하게 복원력이 증가하며 부력증가로 부상하여 새 평형위치를 찾게 된다.

2.2.5 밸러스트 탱크

주 부력통에 탑재되는 밸러스트 수는 부유체가 적절한 자세로 안정되게 부상하고 적절한 복원력을 가지도록 하여야한다. 동시에 집광판이 태양을 향하도록 경사각을 조절할 때는 최소한의 밸러스트 수를 이용하는 것이 바람직하다. 즉 경사각 변화를 일으키기 위한 밸러스트 수는 가급적 부유체의 중심위치로부터 수평 방향으로 멀리 떨어지는 것이 요구되고 동시에 가급적 상부로 이동하여 중량중심을 상승시키도록 하는 것이 바람직하다.

2.2.6 부유체의 일반배치

이상의 검토과정을 거쳐 기대되는 10kW 급 부유식 태양광 발전 시스템을 보이면 Fig. 4와 같다. 즉 주 부력통이 수면 하에 잠겨 있고 이와 연결된 수직기둥과 8개의 방사상으로 뻗쳐진 8개의 경사 기둥으로 밸러스트 탱크와 집광판을 받쳐주는 구조가 되도록 설계하였고, 시험용 발전시스템의 설계에서 각각의 부재치수에 맞추어 제관직업으로 부재를 제작하였다. 시중에 공급되어 있는 규격제품을 최대한 활용하는 것이 제작원가를 낮추는 길이 될 수 있으므로 시험 운영 실적을 검토하여 최적화 하는 것이 필요하다.

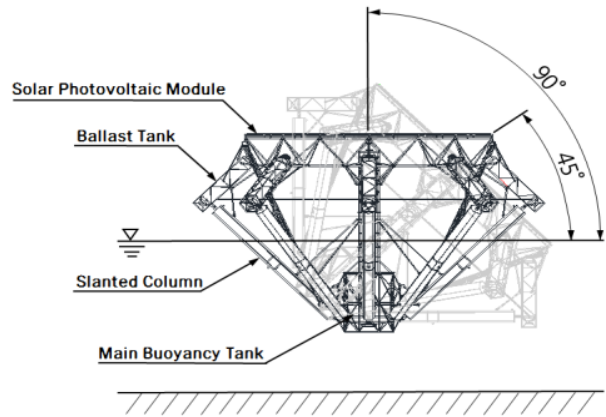


Fig. 4 General arrangement of photovoltaic power generator system



Fig. 5 Production, transportation and installation of floating photovoltaic power generator system

2.3 발전시스템의 제작과 설치

부재의 치수결정 단계에서 구조강도보다는 부력 및 복원력 확보에 주안점을 두고 각종 파이프의 외경을 결정하였다. 그런데 해당직경으로 제작하는 과정에서 생산성에 치중하다보니 파이프의 소재 두께가 과다하게 되는 것을 피할 수 없었다. 공장에서 각종 부품을 생산하고 현장에 운송하여 조립 설치가 불가피하므로 수송수단의 조건을 염두에 두고 생산 설계를 실시하였다. 또한 설치 현장은 저수지 수면으로서 장비의 접근과 운용에 제약이 뒤따르기 때문에 수면 상에서 조립 설치하여야 하였다. 설치지역의 수심에도 제약이 있어 잠수작업과 이동식 육상 크레인을 동시에 활용하였다. (Fig. 5)

3. 부유식 태양광 발전 시스템의 복원성능

3.1 중량과 중심의 계산

Table 2 Calculation of weight

No.	Item	Q'ty	Total Weight(kg _f)
1	Photovoltaic module and cable	40	800
2	Top and center frame	1	2,050
3	Ballast tank and frame	9	1,205
4	Main buoyancy tank and frame	1	960
5	Aux. buoyancy tank and frame	8	2,000
6	Mooring rope guide	2	160
7	Permanent ballast	1	6,000
8	Dynamic ballast water	1	440
Total			13,615

전체 부유식 태양광 발전 시스템의 중량은 부유 구조물의 중량과 안정화 밸러스트 수 중량, 제어용 밸러스트 수 중량으로 구성된다. 부유구조물의 주 부력통은 시중에서 구할 수 있는 직경 2,336mm PE 물탱크에 강관 프레임으로 보강하였고, 보조 부력통은 강재를 외경 508mm 실린더 형태로 성형 후 용접해서 제작하였다. 밸러스트 탱크는 FRP로 만들고 외부에 철강재로 보강하였다. 태양광 모듈이 장착되는 상부 프레임과 하부의 주 부력통 및 보조 부력통과의 구조적 강성을 확보하기 위한 상부 및 중심 프레임의 중량이 2,050kg중으로 가장 많은 중량이 소모되었다. 이들을 집계하면 Table 2와 같은 중량계산표를 구성할 수 있으며 이들을로부터 부유체의 중량과 무게 중심을 구할 수 있다. 밸러스트 수를 제외한 부유 구조물의 무게중심은 부유 구조물이 수평상태, 즉 기울기 0도일 때 KG=5,428mm가 된다. 안정화 밸러스트 수로 주 부력통에 6,000 kg중의 물을 채웠고 동적 밸러스트 수 중량은 최

대 440kg 중이 사용된다. 밸러스트 수의 무게중심은 기울기 0도일 때 KG=2,040mm 이다. 따라서 부유 구조물 중량과 밸러스트 수 중량을 고려한, 전체 무게중심은 KG=3,825mm가 된다.

3.2 부심의 계산

경험적 직관에 의존하여 설계된 부유체가 직립 상태에 있을 때의 건현을 4,100mm로 결정하였으므로 흘수는 4500mm가 된다. 또한 태양을 추적하는 자세제어 과정에서, 제어용 밸러스트 수를 밸러스트 탱크로 이동시키면 부유 구조물의 기울기가 변화되고, 부심의 위치도 변화된다. 따라서 만재배수 상태에 대하여 기울기별 배수량과 부심위치를 계산하면 Table 3과 같다.

Table 3 Calculation of center of buoyancy

Heel angle	Displacement(kg _f)	KB(mm)
0°	13,615	2,040
5°	13,615	2,111
10°	13,615	2,152
15°	13,615	2,160
20°	13,615	2,138
25°	13,615	2,086
30°	13,615	2,004

3.3 메타센터의 확인

부유체의 직립 상태에서는 중앙부의 수직 기둥과 8개의 경사 기둥이 수선면을 형성하므로 수선면에 대한 2차 모멘트를 계산하여야 한다. 즉 Fig. 6에 보인 두 가지의 배치가 대표적인 경우라고 볼 수 있다. 이들 두 경우에 대하여 수선면의 2차 모멘트를 다음과 같이 비교하였다. 수선면을 구성하는 수선면을 살펴보면 한 변의 길이가 c인 정사각형 수직기둥과 주요 요소인 8개의 경사진 보조기둥들이 형성하는 수선면이 된다. 수직기둥이 형성하는 수선면은 한 변의 길이가 c인 정사각형이 되고 경사부재가 형성하는 수선면은 장축의 길이가 2a 이고 단축의 길이가 2b 인 타원이 되고, r은 중앙부에서 타원 중심까지의 거리를 말한다. 여기서 좌측인 경우와 우측인 경우 모두에서 수선면의 2차 모멘트를 구하면 두 경우 모두에서 수직축과 수평축에 대한모멘트가 모두 동일한 값을 가지며 그 크기는 식 (3)과 같다.

$$I = \frac{1}{12}c^4 + 3\pi ab(a^2 + b^2) + 4\pi abr^2 \quad (3)$$

$$= \pi ab(3a^2 + 3b^2 + 4r^2) + \frac{1}{12}c^4$$

그러므로 황경사각을 ϕ 라 할 때, 부심으로부터 메타센터까지의 거리는 $BM = \frac{I}{V}(1 + \tan^2\phi)$ 이므로 배수량 V를 알면 식 (3)을 이용하여 바로 구할 수 있다.

복원력의 지표가 되는 GM값은 식 (4)로 나타내지며 3.1에서 KG를 구하였고 3.2에서 KB를 구하였으므로 만재 밸러스트 수를 고려하면 바로 구할 수 있다.

$$GM = KB + BM - KG \quad (4)$$

여기서 얻어진 GM 값은 양의 값을 가져야하며 그 크기는 초기 복원력을 형성함으로 적절한 크기를 가져야한다.

본 태양 추적 시스템은 태양을 추적하는 과정에서 제어용 밸러스트 수를 이동시키게 되어 부유체의 무게중심 및 부심이 바뀌게 되고 대각도 경사가 발생한다. 본 연구에서는 부유 구조물의 기울기가 0도에서 30도에 이르기까지 경사각에 따른 KB와 BM 그리고 KG 값을 계산하여 GM을 구한 결과를 Table 4에 표시하였다. 기울기가 증가할수록 GM이 증가하므로 복원성에 문제가 없음을 알 수 있다.

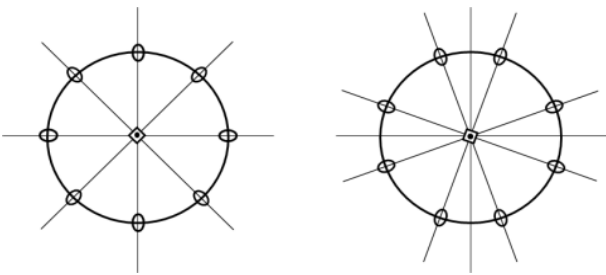


Fig. 6 Shape of waterplane area

본 태양 추적 시스템에서는 태양을 추적하는 과정에서 제어용 밸러스트 수를 이동시키게 되고, 부유체의 무게중심 및 부심이 바뀌게 되지만 안정된 상태가 되어야 한다. 즉, 부유 구조물의 기울기가 0도에서 30도로 변화되면서 매 각도마다 GM이 양의 값을 가져야 한다. 기울기별 GM을 구한 결과가 Table 4에 표시하였다. 기울기가 0도 일 때 보다 기울기가 증가할수록 GM이 증가하는 경향을 가진다.

Table 4 Calculation of meta center

Heel angle	KB(m)	BM(m)	KG(m)	GM(m)
0°	2.04	1.91	3.82	0.13
5°	2.11	1.94	3.89	0.16
10°	2.15	1.98	3.93	0.20
15°	2.16	2.07	3.92	0.31
20°	2.13	2.2	3.88	0.45
25°	2.08	2.35	3.80	0.63
30°	2.00	2.56	3.69	0.87

4. 기타 시스템

4.1 밸러스트 시스템

4.1.1 흡수조절 밸러스트 배관

부유체의 밸러스트 수 시스템은 정상적인 초기 직립 균형 상

태에 이르기 위한 안정화 밸러스트 수와 경사 및 태양추적기능부여를 위한 제어용 밸러스트 수 그리고 태풍 등의 특수 상황에 대처하기 위한 밸러스트 수로 나뉜다. 초기 조건을 충족시키기 위한 안정화 밸러스트 수는 밸브 개방하면 부력통에 적정 수위까지 자동 흡입되고 흡입된 안정화 밸러스트의 일부가 제어용 밸러스트로 사용된다. 태풍과 같은 상태에서 안정성을 높이기 위하여 밸러스트 수를 추가 적재할 때도 수면 하의 자동 밸브를 개방하여 밸러스트 수를 흡입하고 적정 흡수에서 밸브를 자동차단 하도록 한다. 필요에 따라 밸러스트 수를 방출할 때에는 밸러스트 펌프를 활용하도록 한다.

4.1.2 밸러스트 관 계통

4.1.2.1 경사각 제어계통

경사각 제어는 Fig. 7과 같이 경사기둥 상방에 인접하여 설치된 밸러스트 탱크를 이용한다. 수평상태로 정지되어 밤을 지낸 부유식 태양광 추적 발전시스템의 주 부력통으로부터 상부의 밸러스트탱크 ES로 물을 이송시키면 부유체는 ES 방향으로 경사를 일으키고 ES의 밸러스트 수를 주 부력 통으로 되돌리면 직립 상태로 되돌아가게 된다. 밸러스트 펌프는 일출시간으로부터 일몰 시간까지 간헐적으로 작동시키면 태양 전지판이 태양을 추적하도록 할 수 있다.

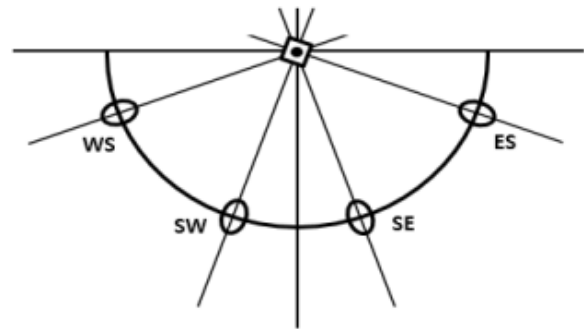


Fig. 7 Ballast tank arrangement

4.1.2.2 태양추적 제어계통

밸러스트 탱크 ES로부터 밸러스트 수를 SE-SW-WS로 순차로 이송시키면 집광판의 경사 방향도 그에 따라 ES로부터 SE-SW-WS 방향으로 태양을 향하여 선화하며 정렬하게 된다. 이때 전지판이 태양을 향하는 경사각을 동시에 조절하려면 부력통과 밸러스트 탱크 사이에 밸러스트 수의 추가 이송이 필요하다. 일몰에 이르러 태양광 발전이 정지되었을 때에는 불필요한 경사를 유지할 필요가 없으므로 밸브를 열면 밸러스트 수는 부력탱크로 중력을 이용하여 자연배수가 이루어지도록 계획하였다. 태양광 발전시스템의 운용 상태를 보이면 Fig. 8에 보인 것과 같다.

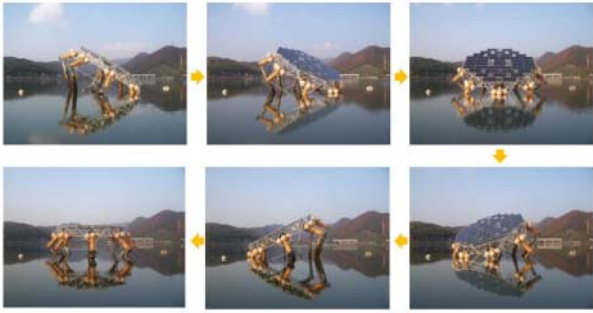


Fig. 8 Solar tracking performance of photovoltaic generator Sundancer-diamond

4.2 계류 시스템

내수면에 설치되는 부유식 태양광 발전 시스템을 특정 수역에 계류하려면 수역에 존재하는 흐름의 영향을 최소한으로 받아야 한다. 흐름의 요인은 강수량의 변화, 조석 간만의 영향을 받아 변화한다. 수심의 변화는 양수 발전용 저수지와 같은 단시간 내 수심변동이 큰 경우와 갈수기에 점진적으로 수심의 변화가 크게 나타나는 경우 등으로 나뉘지며 수심 변동에 적응 할 수 있어야 한다. 그리고 발전시스템이 설치 방향이 바람 (Kim, et al., 2015), 흐름, 부유체 운동 등의 영향으로 각 변위를 일으키는 경우에 대하여 적응 할 수 있어야 하며, 이와 관련한 실험적 연구도 필요하다 (Hong, et al., 2015). 뿐만 아니라 시스템이 경제성을 가지기 위하여서는 발전 시스템의 집단화가 요구되며 집단화된 발전시스템의 일괄 계류에 대한 대책마련이 필수적으로 요구된다.

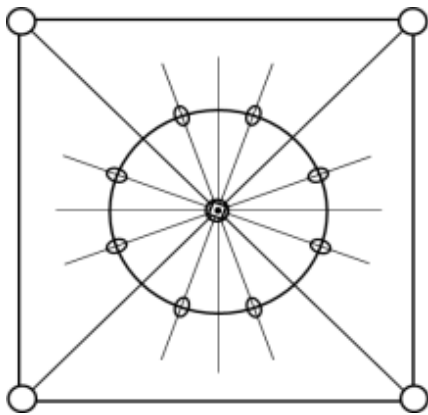


Fig. 9 Unit mooring frame

계류에서 가장 어려운 문제는 부유체가 위치를 유지하며 상하 변위와 회전변위를 허용하여야 한다는 점이다. 위치 유지를 위하여 사용되는 계류삭은 상하변위와 회전 변위에도 영향을 줄 수밖에 없기 때문이다. 따라서 단위 부유체를 Fig. 9와 같은 계류용 틀로 구속하는 방법을 고안하였다. 즉 부유체 주위에 4개의 부력 통을 수면에 띄워 놓고 정사각형으로 간격을 유지시키도록 하였다. 정 사각형 중앙부에 부유체의 수직기둥을 둘러싸는 원형고리를 두고 4개의 부체와 원형고리 사이를 연결하여 형상이 변형되

지 않는 계류 틀을 부착하였다. 부유체를 직접 구속하지 않고 계류용 틀을 구속 계류하는 방법을 사용함으로써 단위 부유체를 계류할 수 있을 뿐 아니라 다수의 발전 단위들을 연결하여 집단화 하였을 때 전체를 계류할 수 있다.

4.2.1 위치 유지 계류

내수면에 계류되는 발전시스템은 수역의 위치, 계절적 인자, 강수량 등에 따라서 부유체가 유체로부터 받게 되는 유체력에는 차이가 나타남으로 이들을 극복하며 일정위치를 유지 할 수 있는 계류를 필요로 한다. 특히 설치 수역이 하천과 같이 홍수기에 상당 유속이 발생하고 집중적으로 부유물이 부유체에 부하를 작용시키는 경우에는 적극적인 대응책이 마련되어야 하지만 시험용 부유식 태양광발전 장치를 설치한 수역은 농업용 저수지로서 유속이나 부유물의 영향은 크지 않으므로 이를 주요 사항으로 다루지 않았다.

4.2.2 방위 적응 계류

부유식 태양광 발전시스템이 태양을 추적하기 위하여서는 근본적으로 기준이 되는 방위를 설정할 수 있어야 하며 바람이나 물의 흐름이 있더라도 발전시스템의 방향이 유지 할 수 있어야 한다. 앞에서 언급한 것과 같이 방위 유지를 위하여서는 위치 유지인 경우와 마찬가지로 계류삭으로 부유체를 구속하여야 하지만 태양 추적을 위하여서는 구조물을 구속하여서는 안 된다. 이 문제를 해결하기 위하여 Fig. 9에 보인 구속용 틀의 부유체의 구조물의 적정위치와 위치고정 부이 사이를 한 쌍의 와이어 로프로 연결하여 주고 로프 길이를 적절하게 조절하여주면 부유체가 경사를 일으키며 회전을 일으킬 때 회전부유체의 수직축에 대한 회전 각 변위를 일정 범위 이내로 억제 할 수 있다.

4.2.3 수심 적응 계류

태양광 발전시스템의 설치위치가 수심의 변동이 크게 나타나는 경우에는 수심 변동에 대처할 수 있는 계획이 필요하다. 양수 발전용 저수지와 같이 단시간 내에 큰 수위 변화가 주기적으로 나타나는 경우와 농업용이나 예비 발전용 저수지와 같이 계절적인 장주기에 걸쳐 큰 수심의 변화가 나타나는 경우에 대한 대처 방안이 달라진다. 발전시스템을 계류한 반월저수지의 수역은 농업용 저수지로서 활용되어 왔으나 근래 용도가 폐기되어 유속은 거의 없고 수위 변동이 크지 않은 저수지이다. 그러나 건기와 우기의 수위변동은 매년 4m 정도임으로 이에 대하여 적응 할 수 있는 계류시스템을 Fig. 10과 같이 구축하였다.

제시한 방법은 부이 하부에 계류삭의 장력을 조절할 수 있는 추를 달아주어 수위의 변화가 일어났을 때 추가 따라서 가라앉으며 일정한 장력을 유지시켜주는 방식이다. 여러 개의 단위 계류용 틀을 연결 배치하면 수역에 적합한 규모의 집단화가 가능하다. 본 논문에서 수상 태양광발전 시험에 사용한 sundancer-

diamond 는 10 kW 급으로서 소형 1개를 대상으로 하였으며 총 배수 중량이 14톤에 미달하는 소형 구조물임으로 계류에 문제점이 없었으나, 다만 집광화를 계획하는 경우에는 발전 유닛 상호간의 그림자 간섭, 급배전 선로, 유지 보수를 위한 접근성 등을 충분히 검토해야 하며 계류식의 통합화와 합리화를 미리 계획하여야 한다. 제시한 수심적응 계류방식은 소규모이고 수심 변동이 적은 수역에서 적용되는 방식이며, 집광화 된 대형 발전 단지인 경우에는 자동 장력 조절 원리를 채택한 대단위 계류 시스템에 대한 별도의 연구가 필요하다고 판단된다.

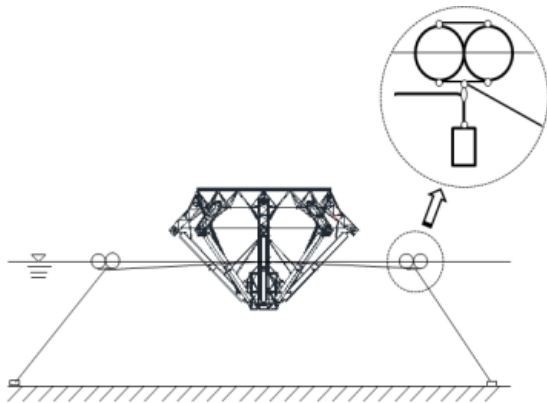


Fig. 10 Depth variation adaptive mooring system

4.3 태양광 발전시스템 제어

4.3.1 제어의 기본 논리

태양광 발전은 일출 후로부터 시작하여 일몰 시간까지 태양광을 받아 태양에너지를 전력으로 변환시키는 것이다. 발전 효율을 극대화하기 위하여서는 집광판을 일출로부터 일몰까지 일조방향에 직교하도록 정렬하는 것이 요구된다. 그러나 실질적인 발전가능시간은 발전설비의 설치 위치의 국지적인 특성과 계절에 따라 다르므로 대체로 일출로부터 일몰 후 발전량이 소멸되는 시점까지 집광판의 방향을 제어하게 된다. 집광판의 방향은 태양의 고도를 매순간 간단한 관계식으로 구할 수 있으므로 이에 맞추어 집광판의 방향을 제어할 수 있다. 그런데 일조 방향은 대체로 시간당 15° 정도의 각 변화를 일으키며 그에 따른 투광면적의 변화는 3%정도이므로 매 10분마다 집광판이 태양을 향하도록 집광판의 경사방향을 측정하고 계산으로 구한 해당 시간의 이상적인 일조방향과의 차이를 수정하는 것을 제어의 기본으로 하였다.

4.3.2 기동제어

발전이 정지되는 아간에는 집광판이 수평으로 놓이도록 하여 예기치 못한 바람의 영향을 최소화 받도록 한다. 일출 후 30분부터 발전이 가능하도록 일출시간으로부터 외부 또는 축전지로부터 전력을 공급받아 집광판을 일조방향으로 정렬한다. 이때 주

부력통의 밸러스트 수를 밸러스트 탱크 ES로 이송하면 계절에 관계없이 집광판이 일출 방향으로 향하게 하고 발전을 개시 하며 집광판의 경사각을 측정하여 제어 범위에 들어가면 펌프 작동을 정지한다.

4.3.3 추적제어

발전 개시 후 10분마다 펌프를 작동시켜 밸러스트 수를 ES로부터 SE로 이송함으로 집광판이 일조방향을 향하도록 제어한다. 이때 집광판의 경사각은 30초간 계속값의 평균값을 기준으로 하고 기준 일조방향과 각도의 편차는 ± 2.5°를 허용하도록 한다.

4.3.4 속영제어

일몰 후에 자연히 발전이 종료되고 밸러스트 탱크의 밸브를 개방하여 밸러스트 수가 부력 통으로 자연 회수되어 집광판은 수평 위치로 되돌아간다. 수평상태의 출수를 확인하여 부력통의 밸러스트 수를 최적 상태로 유지시키고 속영상태로 들어가도록 한다.

4.3.5 위기대응제어

태양전지판은 힌지 구조로 집광판에 설치되어 있어서 정상적인 상태에서는 밀착되어 있으나 과도한 풍압을 받는 경우에는 힌지를 중심으로 태양전지판이 회전을 일으켜 공기흐름 통로가 형성되어 풍압력을 떨어뜨리는 구조로 계획되었다. 이 이외에도 10 kW 발전 시스템에서는 40개의 전지판을 배치하며 중간에 풍압 발생을 줄이기 위한 빈 공간을 두고 있다. 그러나 그와 같은 과도한 풍압 방지대책을 고려하였음에도 불구하고 발전단지의 대표 풍향 풍속계에 지나치게 큰 풍속이 계속되었을 때에는 대책이 필요하다. 풍속과 풍향 계속 신호를 기준으로 복원안정성의 문제가 있다고 판단되는 경우에는 밸러스트 탱크에 제어목적으로 탑재한 밸러스트 수를 부력 통으로 회수하는 한편 부력탱크에 밸러스트 수를 안전 수위까지 추가 주입하여 안전을 유지하도록 한다.

4.4 태양추적제어의 평가

수상 태양광 발전은 수면의 대류 냉각 효과에 의하여 육상 태양광 발전에 비하여 7%정도 발전 효율이 높어진다는 것은 이미 잘 알려져 있다. (Ueda, et al., 2008) 이와 같은 직접적인 효율 향상 뿐 아니라 수상 태양광 발전은 유휴공간으로 평가되는 수면을 활용하여 전력을 생산하는데 대하여 육상 태양광 발전은 육상의 생산유발 효과를 희생시켜야 함을 고려하면 경제성 면에서는 탁월한 우수성을 가진다고 할 수 있다.

4.4.1 고정식 대비 발전 전력 증가 효과

태양의 위치변화를 고려하지 않고 발전 장비를 정남향으로 고

정시켜 놓고 발전하는 경우와 태양을 추적하며 발전하는 경우 발전 효율의 변화를 알아보기로 하고 태양추적식 발전 장비 Sundancer-Diamond에 인접하여 Fig. 11과 같은 방향이 고정되어 있는 부유식 태양광 발전 시스템을 구축하였다.



Fig. 11 Fixed type floating photovoltaic system

발전 효율을 비교하기 위하여 바람 없이 쾌청한 날씨(2013년 10월 05일)에 계측한 발전량을 시설 용량으로 무차원화 하여 Fig. 12에 비교 하였다. 06:18 일출로부터 19:58일몰까지 13:40 발전 하였는데 10kW 용량의 Sundancer-Diamond 는 하루 누적 발전량이 64.3 kWh에 달하였다. 이에 대하여 3kW 용량의 고정식 태양광 발전시스템은 하루 누적 발전량은 14.89 kWh를 기록 하였다. 이들 두 시스템의 발전량을 태양전지판의 단위면적당 발전량으로 변환하여 시간당 발전량을 Fig. 12에 비교하였다. 이들 두 발전곡선의 면적을 비교하면 추적식인 Sundancer-diamond 의 발전량이 고정식 발전시스템에 비하여 23% 높다는 것을 확인 할 수 있었다.

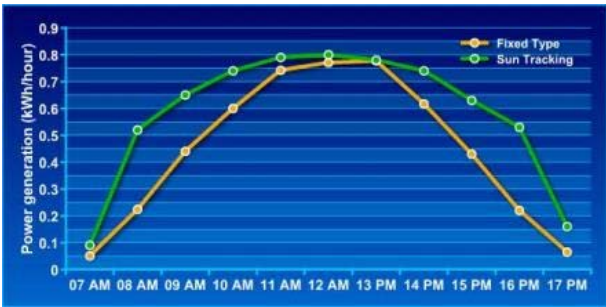


Fig. 12 Performance of Sun Tracking

4.4.2 추적제어 소요 동력의 평가

밸러스트 펌프를 구동하여 추적 장치를 구동시키는데 130 watt 모터를 사용하였으며 10분마다 약 1분씩 구동함으로써 Sundancer-Diamond를 제어할 수 있었다. 즉 당일 제어를 목적으로 사용한 전력은 0.177kWh로서 발전량 64.3kWh 에 비하면 거의 무시할만한 전력이 소모되었음을 알 수 있다.

5. 결 언

유휴공간이라 할 수 있는 저수지나 호수의 수면 상에서 무한

한 자연 에너지인 태양광으로부터 효과적인 발전을 수행할 수 있는 부유식 태양광 발전시스템인 Sundancer-Diamond를 설계하였다. 밸러스트 수를 이동시킴으로 태양추적이 가능한 발전용량 10kW급 발전시스템을 제작하여 경기도 군포시 둔대동에 소재한 반월저수지에 설치 운용하여 성능을 조사하여 다음을 확인 하였다.

부유식 태양광 발전 시스템을 수상에 계류시킨 상태에서 1년 이상 운용하였는데 풍우 및 수심변화에도 성공적으로 운용할 수 있었다.

0.177kWh의 적은 동력을 사용하여 밸러스트 수를 이동시킴으로 태양광 집광판이 태양을 추적하며 최상의 방향으로 정렬되도록 할 수 있었다.

10kW급 발전시스템으로 하절기로부터 가을까지 쾌청한 날에는 1일 최대 누적 발전량이 약 65kWh에 달하였다.

3kW급 고정식 수상 태양광 발전 시스템과 비교하면 밸러스트 수 이동으로 태양을 추적함으로써 발전 효율이 약 23% 향상되는 것이 확인되었다.

태양광 발전 시스템을 수상에 설치하였을 때 약 7%의 효율향상이 일어남을 포함하면 밸러스트 수를 이용하여 태양을 추적하는 발전시스템은 육상시스템에 비하여 약 30%의 효율향상이 있음을 확인할 수 있다.

제한된 부유식 발전시스템은 공장에서 제작하여 설치 환경이 열악한 내수면에 운반하여 조립 및 설치하게 됨으로 설계단계에서 운반을 고려한 표준화가 필요하다.

시제품인 Sundancer-Diamond는 효율은 우수하지만 수면상 높이가 커서 집단화하기 위하여서는 그림자 간섭 등을 신중히 고려할 필요가 있다.

후 기

본 연구는 2014년도에 기계연구원과 공동연구로 시작되었으며 대전지방 고경력 과학기술자 지원사업과 서울대학 공학연구원의 명예교수 학술활동 지원사업, 한국연구재단 기초연구사업(교육과학기술부, NRF-2014R1A1A2059291) 및 2014년도 충남대학교 2014학년도 교원 공무 국외파견 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

References

- Choi, Y.K. Lee, N.H. & Kim, K.J., 2013. Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to the Energy Mix of the Maltese Islands. *Journal of Multimedia and Ubiquitous Engineering*, 25, pp.284-289.
- Choi, Y.K. Lee, N.H. Lee, A.K. & Kim, K.J., 2014. Proposing Offshore Photovoltaic (PV) Technology to the Energy Mix of the Maltese Islands. *Journal of Smart Grid and Clean Energy*, 3(1), pp.70-74.

Kim, E.G. Choi, H.C. Lee, J.S. & Shin, G.W., 2011. Data Analysis of Water Through the Photovoltaic Solar System to the Empirical Study. *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 7, pp.1402–1403.

Kim, H.J. Han, S.G. & Choung, J.M., 2015. A Study on Effect of Aerodynamic Loads on Mooring Line Responses of a Floating Offshore Wind Turbine. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(1), pp.43–51.

Lee, H.M. Han, H.Y. Lee, S.H. & Lim, D.H., 2011. Research for Commercialization of Floated Photovoltaic Systems. *Journal of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 7, pp.1398–1399.

Hong, S., Lee, I., Park, S.H. Lee, C., Chun, H.H. and Lim, H.C., 2015, An Experimental Study of the Effect of Mooring Systems on the Dynamics of a SPAR Buoy–Type Floating Offshore Wind Turbine, *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 7(3), pp.559–579.

Trapani, K. & Millar, D. L., 2013. Proposing offshore Photovoltaic (PV) Technology to the Energy Mix of

the Maltese Islands. *Journal of Energy Conversion and Management*, 67, pp.18–26.

Ueda, Y. Sakurai, T. Tatebe, S. Itoh, A. & Kurokawa, K., 2008, Performance analysis of PV systems on the water. *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, Sep. 1–5, pp.2670–2673



오정근



김준호



김승섭



김효철



류재문