

추적식 수상 태양광발전 시스템의 설계 및 시공

김선희* · 이영근* · 서수홍** · 주형중** · 윤순종***†

Structural Design and Installation of Tracking-type Floating PV Generation System

Sun-Hee Kim*, Young-Guen Lee*, Su-Hong Seo**, Hyung-Joong Joo**, Soon-Jong Yoon***†

ABSTRACT: Most of energy are obtained from oil, coal, and natural gas, most likely, fossil fuel which is limited throughout the world. Recently, high crude oil price, climate change, oil depletion, etc. are main reason to get attention to non-fossil energy including renewable energy in the world. In this study, we studied analysis and design of structure system composed of pultruded fiber reinforced polymer composite (PFRP) which has many advantages such as high specific strength and stiffness, high corrosion resistance and chemical resistance. For the design and construction of floating-type structure, PFRP structural members may be the first choice. Design of tracking-type floating PV generation structure was performed by using the results of the finite element analysis. The structure is fabricated and installed on the water surface. Before the installation of the structure, safety related problems associated with installation and operation are investigated using the finite element simulation and it was found that the structure is safe enough to resist externally applied loads.

초 록: 대부분의 에너지는 전세계적으로 제한되어 있는 석유, 석탄, 천연가스 등 주로 화석연료로부터 얻어지고 있다. 최근, 고유가, 석유자원의 고갈, 기후변화 등이 신재생에너지를 포함한 비화석 연료가 세계적으로 주목을 받고 있는 이유 중의 하나이다. 이 연구에서는 고비강성 및 비강도, 고내부식성 및 내화학성 등을 장점으로 갖고 있는 펄트루전 FRP(PFRP)를 사용하였다. 따라서 부유식 구조물의 설계와 시공을 위해서는 PFRP 재료가 우선적으로 선택될 수 있다. 추적식 수상 태양광발전 구조물의 설계는 유한요소해석 결과를 사용하여 수행되었으며, 구조물은 조립되어 수상에 설치되었다. 구조물을 설치하기 전에 안전성 문제를 유한요소법을 사용하여 검토하였으며, 그 결과 설계, 제작, 시공된 구조물은 외적으로 작용된 하중을 지지하는데 충분히 안전함을 알 수 있었다.

Key Words: 추적식 수상 태양광발전 구조물(tracking-type floating PV generation structure), 펄트루전 FRP(pultruded fiber reinforced polymeric plastic, PFRP), 유한요소해석(the finite element analysis), 설계(design), 설치(installation)

1. 서 론

1970년대 두 차례의 심각한 석유파동을 겪은 이후, 국내에서는 장기적이고 안정적인 에너지 수급의 필요성을 인식하기 시작하였으며, 태양광 및 풍력 등의 신재생에너지

에 대한 적극적인 개발과 관련 연구 사업에 많은 관심을 기울이기 시작하였다.

태양광발전은 전세계적으로 환경문제 관련 기후변화협약(교토의정서) 등 21세기의 새로운 패러다임의 변화와 정부에서 추구하고 있는 저탄소녹색성장산업의 선두주자로

Received 4 December 2013, received in revised form 25 April 2014, accepted 25 April 2014

*홍익대학교 토목공학과 구조공학전공 대학원

**㈜아이시스이엔씨

***홍익대학교 토목공학과 구조공학전공, Corresponding author (E-mail: sjyoon@hongik.ac.kr)

각광받고 있다. 정부에서는 2009년 태양광 10만호 보급 사업을 추진하였고, 그 후 신재생에너지법을 개정하였다. 신재생에너지 산업 중 하나인 태양광발전 산업은 대부분 태양광 모듈, 태양전지 개발에 국한되어 있으며, 구조물에 대한 연구는 미미한 실정이다.

최근 국내에서는 부유식 태양광발전 구조물에 대한 연구가 활발히 진행 중이며, 2009년 국내 최초로 부유식 태양광발전 시스템을 제작하였고, 이후 다수의 수상태양광 발전시스템의 설치가 진행되었다. 특히 2009년 홍익대학교에서 수행한 연구는 내구성 및 내부식성이 우수한 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced polymer plastic, FRP)을 활용한 부유식 태양광발전 구조물을 설계 및 제작하였다[1-3].

기존 연구[4]에서 제안한 FRP를 활용한 부유식 태양광발전 구조물 중에서 SMC(Sheet molding compound) 공정으로 제작한 FRP 압축재를 사용하여 태양의 방위와 고도를 추적 가능하도록 하면서 수상에 설치되는 구조물을 설계하였다.

이 연구에서 사용한 펄트루전 FRP(Pultruded FRP, PFRP)는 내구성, 내부식성, 경량성이 우수한 부재이며, 기존 연구에서 제안한 SMC 공정으로 제작한 프레임을 거치하고 난 후 볼트로 태양광모듈을 조립할 수 있도록 설계하였다. 수상에 떠 있는 구조물은 지상에 설치되어 있을 때와 달리 수면유동의 영향을 받기 때문에 안전성 확보가 최우선이다. 특히, PFRP는 강재와 달리 제조공정 특성상 부재의 축방향과 직각방향에 대한 재료의 역학적 성질에서 차이를 나타내고 있기 때문에 재료적 특성을 고려한 구조물의 설계가 이루어져야 한다. 또한, 수상에서 회전하는 구조물이 회전중심을 유지시키고, 구조물의 회전을 원활하게 하고, 구조물을 안전하게 시공하기 위해 유한요소해석을 사용 수상구조물의 구조적 안전성을 검토하여 설계에 반영하였다.

2. 추적식 수상 태양광발전 구조물

2.1 추적식 태양광발전 구조부재

추적식 수상 태양광발전 구조물의 주요 부재는 내구성, 내부식성, 경량성이 뛰어난 PFRP와 SMC를 사용하였다. PFRP 부재는 동일한 단면을 연속적으로 생산하여 프레임 형태 또는 Grid 형태의 전반적인 구조물에 사용하였으며, SMC는 몰드 제작에 따라서 부재의 형상을 자유롭게 정할 수 있으므로 기존에는 다수의 접합부가 밀집되어 시공이 어려웠던 태양광패널의 하부 압축재로서 활용하였다. 여기서 사용된 PFRP와 SMC는 Glass fiber와 Polyester resin을 사용(Fiber volume ratio: 40~50%)하여 제작되었다. Fig. 1은 SMC 공정으로 제작한 수직프레임이고, Fig. 2는 PFRP로 제작한 주요 부재이다.

2.2 추적식 태양광발전 구조부재의 역학적 성질

주요 구조부재로 활용되는 PFRP 부재의 역학적 특성을

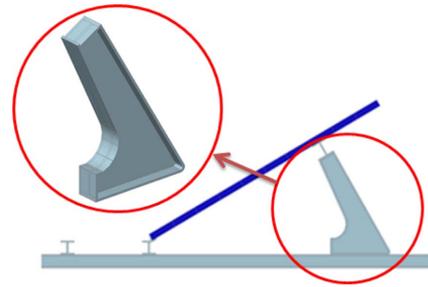


Fig. 1. SMC compression member



Fig. 2. PFRP members

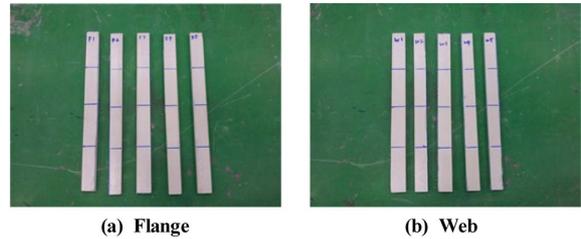


Fig. 3. Tensile properties of pultruded FRP specimen



Fig. 4. Tensile test (Pultruded FRP)

조사하기 위해 각 구조부재를 절단하여 인장강도시험 시편을 제작하고 시험(KS M ISO 527-4)을 수행하였다. 펄트루전 공정으로 제작한 I형 단면은 플랜지와 복부의 적층량이 달라지기 때문에 Fig. 3과 같이 복부와 플랜지로 나누어 각 5개의 시편을 제작하였다. 각 시편 중앙부분에 길이방향과 길이직각방향으로 변형률게이지를 부착하였으며 하중은 1,000 kN 용량의 UTM을 사용하여 3 mm/min의 속도로 재하하였다. Fig. 4는 장착된 시편의 형상을 나타낸다.

인장강도시험 결과 응력-변형률 관계가 선형으로 증가하다가 최종적으로 취성파괴가 발생하였으며, 파괴된 시편



Fig. 5. Failure of the tensile test specimen

Table 1. Result of PFRP tensile test

Specimen No.	Tensile strength (f_{11} , MPa)	Young's modulus (E_{11} , GPa)	Poisson's ratio (ν_{12})
Flange	F-1	401.34	32.04
	F-2	387.40	34.54
	F-3	404.90	35.24
Average	397.88	33.94	0.33
Web	W-1	461.79	30.41
	W-2	466.41	29.74
	W-3	438.54	29.28
Average	455.58	29.81	0.27

의 형태를 Fig. 5에 나타내었다. 또한 실험결과로부터 최대와 최소값을 제외한 중앙의 3개의 시편에 대한 인장강도와 탄성계수, 포아송비를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

2.3 추적식 태양광발전 구조물 기본설계

추적식 수상태양광 구조물을 설계함에 있어서 기본 개념은 수상에서 균형을 유지할 수 있는 2축 대칭의 단위구조물을 설계하는 것과 각 단위구조물을 효율적으로 연결할 수 있는 형태를 취하는 것이다. 이러한 기본 개념을 바탕으로 8각형 형태의 단위구조물 4개와 접속반 및 배전반을 설치할 1개의 4각형 구조물을 연결하는 형태로 설계하였다. 각각의 8각형 구조물의 단위발전용량은 약 25 kW씩이며, 태양광의 추적형태에 따른 차이를 검증하기 위한 실증단지 구축을 위하여 고정형 2개, 수동경사가변형 1개, 자동경사가변형 1개씩을 Fig. 6과 같이 구성하였다.

2.3.1 고정식

고정식 태양광발전 구조물은 PFRP 부재와 SMC 수직프레임에 태양광모듈을 거치한 후 볼트로 조립하는 방식이다. Fig. 7는 고정식 태양광발전 구조물의 형상이다[5].

2.3.2 수동경사가변식

Fig. 8은 수동경사가변식 태양광발전 구조물의 형태이며 이 구조물에 태양의 위치를 확인할 수 있는 광센서를 부착하여 태양의 움직임에 따라 모듈이 경사지게 가변하는 방식이다[5].

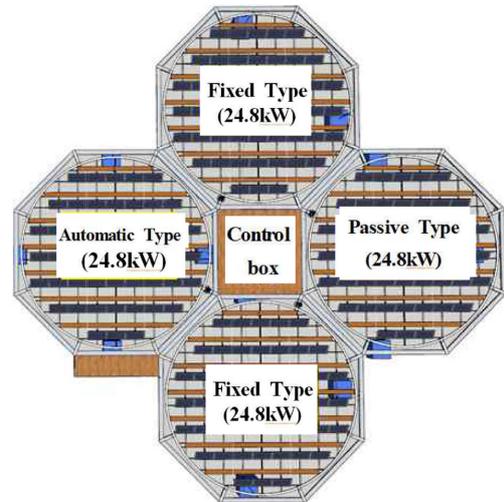


Fig. 6. Design of floating PV generation structure

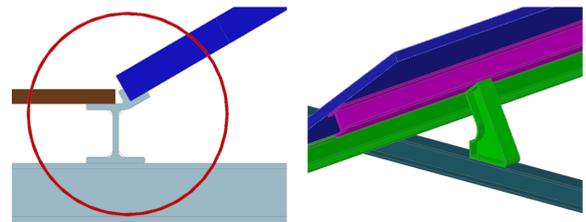


Fig. 7. Fixed PV generation structure

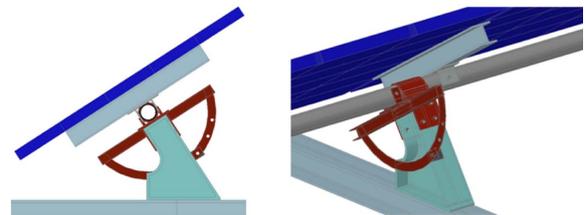


Fig. 8. Passive-type PV generation structure

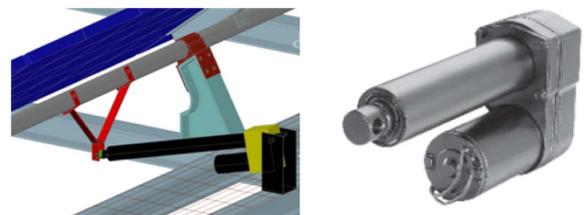


Fig. 9. Automatic-type PV generation structure

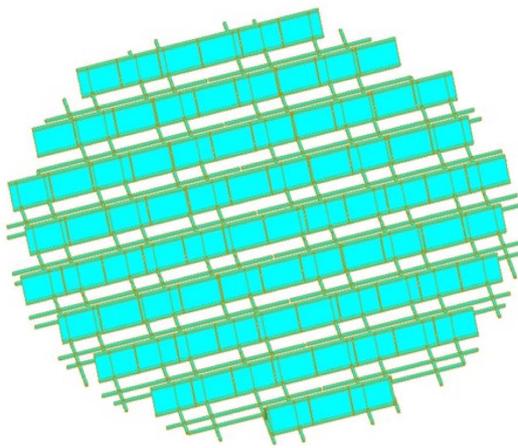
2.3.3 자동경사가변형

자동경사가변형 태양광발전 구조물은 사전에 프로그램된 알고리즘에 의해 계절별 또는 시간대별 태양의 방위각을 산출하여 태양의 위치를 찾아가도록 설계되어 있으며, 모듈을 지지하는 지지대 하부에 롤러를 부착하고 지지대 하부에 접속되는 부유체 구조물 상부에 롤러 가이드를 설치

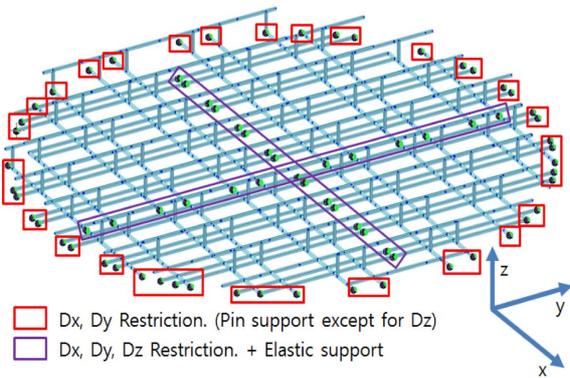
하여 철재 로드 바와 연결된 다수의 지지대를 Fig. 9의 유압 장치를 이용하여 모듈의 경사를 가변하는 방식이다[5].

Table 2. Mechanical properties of SMC materials [4]

Material	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)	Poisson Ratio
SMC	72.36	34.47	14.33	0.25



(a) Model



(b) Boundary conditions

Fig. 10. FEA modeling

3. 유한요소해석

3.1 모델링

수상 태양광발전 구조물은 육상에 설치되는 구조물과 달리 수상에 설치되기 때문에 시공 후 구조물의 안전성 확보가 중요하다. 수상에서 구조물의 안전성을 판단하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 해석에 사용된 PFRP와 SMC 재료의 역학적 성질은 Table 1과 기존의 참고문헌[4]의 실험결과를 참조하였으며 SMC의 역학적 성질은 Table 2에 나타내었다.

유한요소해석에서는 Fig. 6의 1개의 팔각형 형태의 구조물 하나에 대하여 해석을 수행하였다. 특히 팔각형 형태의 구조물에서 외부의 팔각형 고정구조물은 회전구조물의 가이드 역할만 수행하고 각각 별도의 구조체로 간주할 수 있기 때문에 외부 고정형 구조물을 제외하고 내부의 회전구조물만을 고려하여 해석모델을 생성하였다. 유한요소해석은 상용 구조해석프로그램 중 하나인 MIDAS CIVIL 2006[6]을 사용하였다. 유한요소해석모델의 형태는 Fig. 10(a)에 나타내었다. 해석에 사용된 요소는 MIDAS에서 제공하는 BEAM element와 PLATE element이며, 1186개의 BEAM element와 165개의 PLATE element가 사용되었다. 해석모델에 사용된 노드의 수는 925개이다.

경계조건은 수상에서 발생할 수 있는 상황 중에서 가장 가혹한 상황에 맞추어 설정하였으며, 입력된 경계조건의 형태를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 원형구조물의 내부의 경계조건은 변위를 허용하지 않는 힌지의 조건이며, 원형구조물의 외측의 경계조건은 상하변위만을 허용하는 힌지로 설정하였다. 이러한 경계조건은 파도의 파장이 매우 길고, 파고가 매우 높을 경우 구조물의 중앙부분의 부력체 만이 부력에 의하여 지지되고 나머지의 구조물은 공중에 떠 있을 경우를 가정한 것이다.

추적식 수상 태양광발전 구조부재 단면의 특성은 Table 3와 같이 설정하였으며, 부재 단면의 위치는 Fig. 11에 표시하였다.

유한요소해석에서 재료의 물성치는 Table 1과 2의 값을 적용하였고, 유한요소해석 모델에 적용한 하중은 구조물,

Table 3. Characteristics of members

Location	Member Type	Area (cm ²)	Asy (cm ²)	Asz (cm ²)	Ixx (cm ⁴)	Iyy (cm ⁴)	Izz (cm ⁴)
①	H-100 × 100 × 10 × 10	28.00	16.67	10.00	9.67	449.33	167.33
②	H-100 × 100 × 10 × 10	28.00	16.67	10.00	9.67	449.33	167.33
③	H-124 × 100 × 10 × 14 (Considering connection)	34.00	20.00	12.40	16.21	825.72	200.83
④	H-100 × 100 × 10 × 10	34.00	20.00	12.00	11.67	811.33	288.83
⑤	H-100 × 100 × 10 × 10 (SMC with Max. cross-section)	30.00	16.67	12.00	10.33	690.00	167.50

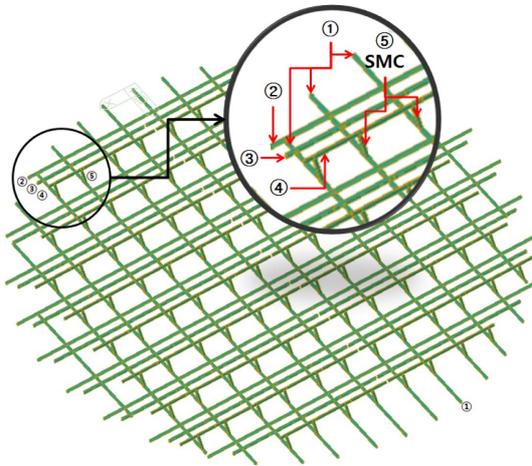


Fig. 11. Location of member

Table 4. Wind load

Wind velocity (m/s)	50
Roughness coefficient	D
Gust-effect factor	1.0
Importance factor	1.10
Topographic factor	1.30
Pressure exposure coefficient	1.13
Design wind velocity (m/sec)	62.15
Wind pressure (kN/m ²)	4.35

Table 5. Snow load

Snow load (S_g)	0.5
Roof snow load coefficient (C_b)	0.5
Exposure coefficient (C_e)	0.8
Thermal factor (C_t)	1.2
Importance factor (I_s)	1.0
Slope factor (C_s)	1.0
Snow pressure (kN/m ²)	0.24

Table 6. Self-weight

Load	Magnitude
PV module	220.73 N/EA
Floating object	392 N/m
Foot panel (Synthetic lumber)	7.059 N/m

태양광모듈, 발판, 부력체 등의 자중과 설계풍속 50 m/s의 풍하중 및 적설하중을 고려하였으며, 유한요소해석에 적용한 풍하중, 적설하중, 자중은 Table 4~6에 정리하였다. 풍하중과 적설하중은 압력의 형태로 태양광패널에 수직으로 작용하도록 입력하였다. PFRP 프레임과 SMC 부재의 자중은 제조사에서 제공한 16.55 kN/m³의 단위중량을 MIDAS에 입

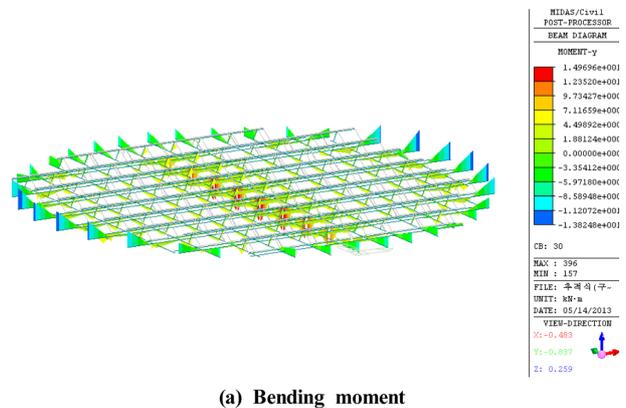
력하여 작용시켰고, 그 외의 태양광패널, 부력체, 발판의 중량은 각 구조체가 결합되는 부분에 각각 Beam element load로 적용하였다.

3.2 유한요소해석 결과

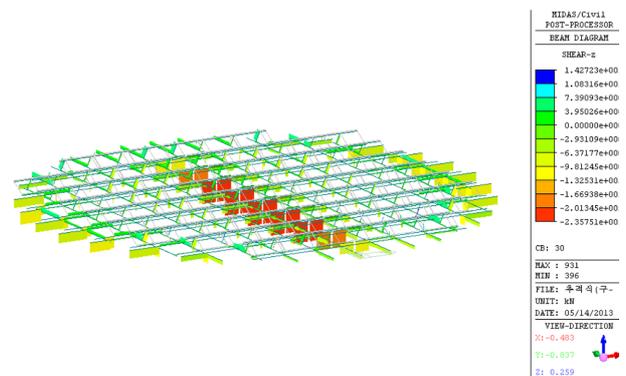
일반적으로 FRP를 재료로 사용한 구조물은 허용응력설계법을 이용하며, AASHTO(2001)와 Strongwell사의 Design manual에서 제시하고 있는 안전율로 실험을 통하여 구한 재료의 인장강도를 나누어주어 허용응력을 결정한다. 유한요소해석을 수행한 결과, 추적식 수상 태양광발전 구조물의 인장응력, 압축응력, 전단응력, 휨인장/압축응력을 구하였으며, 해석결과 중 휨모멘트와 전단력의 결과를 Fig. 12에 나타내었다. 유한요소해석을 통하여 얻은 인장, 압축, 전단, 휨인장/압축응력을 허용응력과 비교한 결과를 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 보여주고 있는 바와 같이 해석결과는 허용응력에 대하여 충분히 안전함을 확인할 수 있었다.

4. 추적식 수상 태양광발전 구조물 시공

추적식 수상 태양광발전 구조물이 시공되는 장소는 경상남도 합천군 합천댐 저수지 내부이며, 음영 및 연무 등 태양광발전이 저해되는 요인이 가장 적으면서도, 집중호우시



(a) Bending moment



(b) Shear force

Fig. 12. Result of the FEA

Table 7. Safety check using FEA results

Member	Stress (MPa)							
	Tension		Compression		Shear		Flexure	
	Max. (σ_t)	Allowable (σ_{ta})	Max. (σ_c)	Allowable (σ_{ca})	Max. (σ_v)	Allowable (σ_{va})	Max. (σ_b)	Allowable (σ_{ba})
①	19.9	231.8	17.1	154.50	11.1	26.37	81.5	185.40
②	5.6		7.1		14.7		153.8	
③	40.4		2.0		22.5		122.0	
④	7.2		22.7		16.8		102.7	
⑤	2.3		4.4		8.0		130.0	

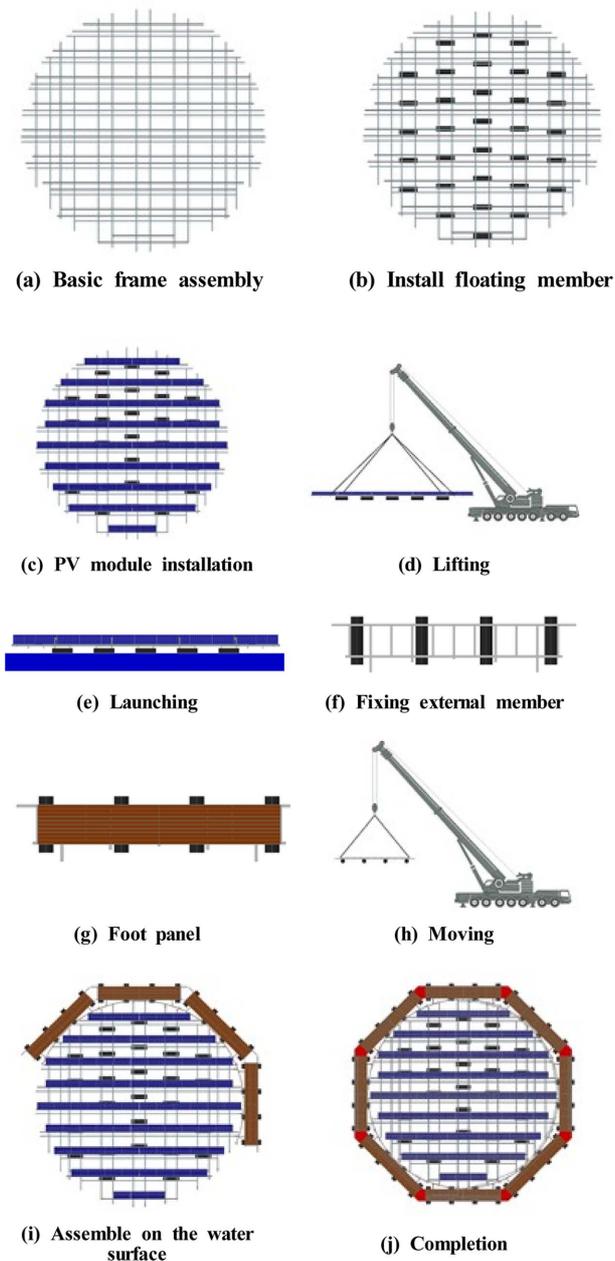


Fig. 13. Fabrication sequence of floating-type PV energy generation structure



Fig. 14. Installation of floating-type PV energy generation structure

발생하는 유송잡물이 쌓이지 않고, 유속이 빠르지 않은 안전한 곳을 선정하였다.

수상 태양광발전 구조물은 수상에 설치하므로 현장조건을 고려하여 수상에서 수행하는 작업을 최소화해야 하며, 이러한 기본 개념하에 작업절차를 계획하였다. 수상 태양광발전 구조물의 설치과정은 다음과 같다. 우선, 주요 부재를 가공하여 내부 회전구조물을 조립한 후, 부력체를 설치하고 태양광모듈을 설치하는 지상작업을 통해 구조물의 기본 작업이 이루어져야 한다. 지상작업이 완료된 후 건설장비(크레인)를 사용하여 수상에 부유시킨다. 내부 회전구조물이 진수된 상태에서 외부 고정구조물을 지상에서 일정단위로 조립한 후 수상으로 옮겨 구조물에 조립한다. 이러한 일련의 과정을 통하여 1개의 팔각형 형태의 구조물이 완성되며 총 4개의 구조물을 제작하였다. 위에서 설명한 시공 절차를 Fig. 13에 나타내었다. 조립 이후에는 수상에 부유된 구조체를 설치 위치로 이동하였으며, 구조체의 위치고정을 위하여 계류작업을 실시하였다. 최종적으로 추적식 시스템을 위한 구동장치를 설치하고, 배전반 등 전기기기설비(Control box)를 설치하여 시공을 완료하였다.

Fig. 13의 시공절차에 따라 실제 시공이 이루어졌으며, 시공하는 과정 중에서 개별적으로 구조체가 제작되는 현장



Fig. 15. Completion of floating-type PV energy generation structure

의 모습을 Fig. 14에 나타내었다. 최종적으로 합천댐 현장에 수상 태양광발전 구조물을 설치하였으며, 성공적으로 시공을 완료하였다. 수상 태양광발전 구조물이 설치된 모습을 Fig. 15에 나타내었다.

5. 결 론

이 연구는 수상 태양광발전 구조물의 설계에서 시공에 이르는 과정을 다루었다. 우선 개념설계를 먼저 설정하고 추적식 시스템을 수상 태양광발전 시스템에 적용할 수 있도록 기본 설계를 실시하였으며, 수상에 설치되는 구조물의 특성을 반영하여 수상의 특수상황을 고려한 수치해석 결과로부터 단면설계를 실시하였다. 구조물에 대한 유한요소해석 결과를 구조물의 사용 재료별 허용응력과 비교하여 안전하게 부재 단면의 설계를 완료하였다. 또한, 이러한 설계, 조립, 설치 과정을 바탕으로 합천댐에 시공을 완료하였으며, 시공과정 및 구조시스템 운용중의 구조물의 안전

성 및 부유 구조물의 안정성을 확인하였다.

향후 구조물에 대한 구조적 안전성을 확인하기 위한 계측을 계속적으로 실시할 예정이며, 또한 고정식, 수동식, 자동식 태양광발전 단위시스템별 발전효율 측정과 경제성 분석에 대한 연구가 진행될 예정이다.

후 기

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(12CCTI-C060796-02-000000)이 지원한 연구과제의 연구비 지원으로 수행된 것이며, 지원에 대해 감사드립니다.

참고문헌

1. Lee, S.H., Nam, J.H., Joo, H.J., and Yoon, S.J., "Design of Isolated Floating Type Photovoltaic Energy Generation Structure Using PFRP Member," *Proceeding of the 2012 Spring Conference, Korean Society for Composite Materials*, Sejong, Korea, May, 2012, pp. 71-72.
2. Choi, J.W., Lee, Y.G., Nam, J.H., and Yoon, S.J., "Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation Steel Structure by LRFD," *Proceeding of the 2012 Conference, Korean Society of Steel Construction*, Suwon, Korea, June, 2012, pp. 173-174.
3. Lee, Y.G., Joo, H.J., Nam, J.H., and Yoon, S.J., "Modified Design of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, 2010, pp. 18-27.
4. Choi, J.W., Joo, H.J., Nam, J.H., Hwang, S.T., and Yoon, S.J., "Performance Enhancement of Floating PV Generation Structure Using FRP," *Composites Research*, Vol. 26, No. 2, 2013, pp. 105-110.
5. Lee, S.H., Development of ICT Convergence Technology for Commercialization of Floating Photovoltaic System, *Research Report, K-water*, 2013.
6. MIDAS Information Technology Co., Ltd., Analysis Reference, 2009.