

수상 부유식 태양광발전 구조물의 구조적 성능 평가

최진우* · 서수홍** · 주형중*** · 윤순중****

Choi, Jin Woo*, Seo, Su Hong**, Joo, Hyung Joong***, Yoon, Soon Jong****

Structural Performance Evaluation of Floating PV Power Generation Structure System

ABSTRACT

In recent years, numerous environmental problems associated with the excessive use of fossil fuel are taking place. For an alternative energy resource, the importance of renewable energy and the demands of facilities to generate renewable energy are continuously rising. To satisfy such demands, a large number of photovoltaic energy generation structures are constructed and planned with large scale. However, because these facility zones are mostly constructed on land, some troubles are occurred such as rising of construction cost due to the cost of land use, environmental devastation, etc. To solve such problems, the floating type photovoltaic energy generation system using FRP members have been developed in Korea. FRP members are recently available in civil engineering applications due to many advantages such as high strength, corrosion resistance, light weight, etc. and they are suitable to fabricate the floating structures because of their material properties. In this study, the analytical and experimental investigations to evaluate the structural performance of floating PV generation structure and SMC FRP vertical member which is used to fabricate the structure were conducted. The static and dynamic performances of floating PV generation structure are evaluated through the FE analysis and the experiment, respectively. Moreover, the structural safety evaluation and buckling analysis of SMC FRP vertical compression member are also conducted by the FE analysis, and the structural behavior of SMC FRP member under compression and pullout is investigated by the experiments. From this study, it was found that the structural system composed of pultruded FRP and SMC FRP members are safe enough to resist externally applied loads.

Key words : Floating PV generation structure, FRP, Compression behavior, Experiment, Safety, Buckling

초 록

최근 화석연료의 과도한 소비로 인해 다양한 환경문제가 발생하고 있으며, 이에 대한 대안으로 신재생에너지의 중요성과 그에 대한 시설의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 이러한 수요를 만족하기 위하여, 다수의 태양광발전 구조물들이 건설, 계획되고 있다. 그러나 대부분의 태양광발전 시설들은 육지에 시공되고 있기 때문에 토지 이용에 따른 건설비의 증가와 토지 개간에 의한 추가적인 환경문제 등이 발생하고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근 국내에서는 FRP를 활용한 수상 부유식 태양광발전 구조물에 대한 연구를 지속적으로 수행하고 있다. FRP는 높은 강도와 내부식성 및 작은 단위중량 등의 장점을 가지고 있기 때문에 최근 토목분야에서 각광받고 있으며, 이러한 재료적 특성은 자중에 따라 부력체의 크기가 결정되는 수상 구조물에 특히 유용하다. 이 연구에서는 수상 부유식 태양광발전 구조물과 구조물을 구성하는 SMC FRP 수직재의 구조적 성능을 평가하기 위한 해석적, 실험적 연구를 수행하였다. 수상 부유식 태양광발전 구조물은 유한요소해석을 통해 정적거동을 평가하고, 실험을 통해 동적거동을 평가하였다. 또한 SMC FRP 수직재는 유한요소해석을 통해 구조안전성 및 좌굴안정성을 평가하였으며, 실험을 통

* 정회원 · (주)아이시스이엔씨 팀장, 공학박사 (ISIS E&C Co., Ltd. · jinu385@hanmail.net)

** 정회원 · (주)아이시스이엔씨 팀장, 공학석사 (ISIS E&C Co., Ltd. · sshplus98@hanmail.net)

*** (주)아이시스이엔씨 대표이사, 공학박사 (ISIS E&C Co., Ltd. · hj5898@hanmail.net)

**** 정회원 · 교신저자 · 홍익대학교 토목공학과 교수, 공학박사 (Corresponding Author · Hongik University · sjyoan@hongik.ac.kr)

Received April 18, 2014/ revised June 17, 2014/ accepted August 24, 2014

해 압축 및 인발 하중에 대한 구조적 거동 특성을 검토하였다. 검토 결과 펄트루전 FRP (pultruded FRP)와 SMC (Sheet Modoling Compound) FRP로 구성된 구조시스템은 외부하중에 대한 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다.

검색어 : 수상 부유식 태양광발전 구조물, FRP, 압축거동, 실험, 안전성, 좌굴

1. 서론

신재생에너지는 화석연료를 대체할 차세대 에너지원으로 각광 받고 있고, 세계적으로 관련 산업이 꾸준히 발전하고 있으며, 산업 육성을 위한 관련 제도 또한 마련되고 있다. 일본에서는 후쿠시마 원전사고 이후 태양광 및 풍력 등의 산업 지원을 위한 신재생에너지 법을 제정하였고(Choi et al., 2013), 국내에서는 2012년부터 태양광, 풍력, 수소, 연료전지 등의 산업화를 위하여 발전량의 일정비율을 신재생에너지로 의무화하는 신재생에너지 공급의무화 제도 (Renewable Portfolio Standard, RPS)를 도입하였다(Joo et al., 2013).

신재생에너지 중 하나인 태양광발전은 지리적 위치조건으로 인해 높은 일조량을 나타내는 국내의 특성상 발전가능성이 매우 높으며, Fig. 1에 나타난 것과 같이 2003년 이후 보급량이 지속적으로 증가하고 있다(Statistics Korea, 2013). Fig. 1에서 태양광발전량은 별도로 표기하였고, 단위는 천TOE (Tonnage of Oil Equivalent)이며, TOE는 에너지원의 발전량을 석유를 연료로 한 발전량으로 환산한 단위이다. 또한, 태양광발전은 지속적인 연구를 통한 태양광 모듈의 발전효율 향상으로 인해 향후 계속 발전할 것으로 생각된다. 그러나 태양광발전과 관련된 연구는 대다수가 태양광모듈의 성능 향상에 국한되어 있고, 태양광모듈을 지지하기 위한 구조형식에 대한 연구는 실질적으로 미미하다. 특히 현재 태양광모듈을 지지하

기 위한 구조물은 설계기준이 별도로 마련되어 있지 않아 설치업자에 의해 무분별하게 설치되어 안전성에 큰 문제를 드러내고 있으며, 초기 시공에서 발생한 구조적 문제를 해결하기 위해 지속적인 보수 보강이 이루어지고 있다.

한편, 국내에서는 최근 내구성이 우수하고, 수변 및 해양 환경에서 내부식성이 뛰어난 섬유강화플라스틱(Fiber Reinforced Polymer Plastic, FRP)을 이용한 수상 부유식 태양광발전 구조물에 대한 연구가 진행되었으며(Lee et al., 2010; Choi et al., 2010; Choi et al., 2012), 그 결과 다수의 수상 부유식 태양광발전 구조물이 설계 시공되고 있다. 수상 부유식 태양광발전 구조물은 바다, 강, 댐, 저수지 등의 유희수면을 효율적으로 사용할 수 있고, 대규모 토공사로 인한 환경훼손을 방지할 수 있으며, 수상에서 태양광의 난반사로 인해 발전량 또한 지상보다 증가하는 것으로 알려져 있다.

기시공된 수상 부유식 태양광발전 구조물은 수면의 움직임으로 인한 불안정한 경계조건을 극복하고 시공성을 향상시키기 위해 여러 개의 단위구조물을 연결하여 단지를 구성한다. 단위구조물은 크게 태양광모듈, FRP 구조용 부재, 부력체, 연결철물 등으로 구성되며, 단위구조물의 형태 및 구성은 Fig. 2에 나타내었다(Yoon, 2013). Fig. 2에서 태양광모듈 지지 부재(solar module support frame)를 연결하는 수직재는 SMC FRP로 제작하였으며, 그 외의 부재는 PFRP로 제작하였다.

단위구조물에 사용한 FRP 부재는 태양광모듈을 결합하기 위한 SMC FRP 수직재 및 태양광모듈 받침부재와 이들을 지지하기 위한 태양광모듈 지지부재, 부력체를 연결하기 위한 부력체 연결부

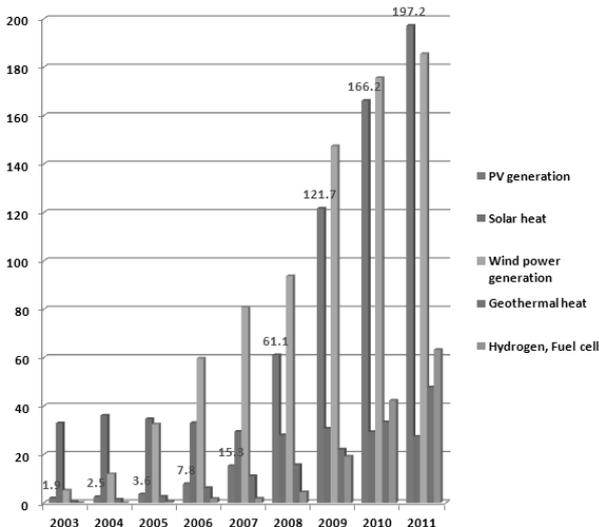


Fig. 1. Trend of Renewable Energy (Statistics Korea, 2013)

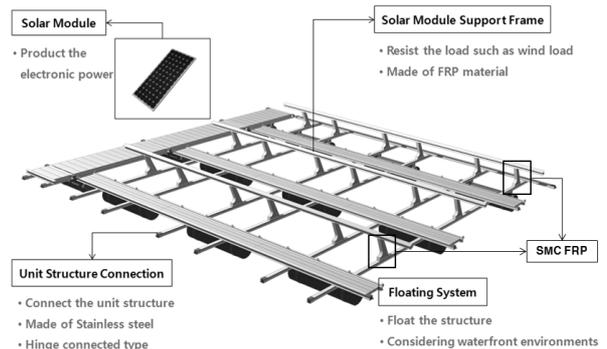


Fig. 2. Composition of Floating PV Generation Structure (Yoon, 2013)

재 및 유지관리 등을 위한 이동통로를 결합하고 부력체 연결부재와 결합하여 구조물의 좌우방향에 대한 강성을 확보하기 위한 발판 연결부재로 구분한다(Choi et al., 2013; Yoon, 2013).

단위구조물에 사용한 FRP 부재는 펄트루전 방식(pultrusion process)과 SMC 방식(sheet molding compound process)으로 생산한다. 펄트루전 공정은 기계장치에 의해 필라멘트나 선형의 섬유에 수지가 스며들게 한 후 일정한 단면을 가진 가열된 금속형틀을 이용하여 연속적으로 부재를 생산하는 방법이다. 펄트루전 FRP는 보강섬유가 부재 축방향으로 배치되기 때문에 축방향의 강도와 강성이 뛰어나고, 대량생산이 가능하기 때문에 경제적이며, 단면 형태가 일정한 부재를 생산할 수 있기 때문에 최근 건설분야에서 관심이 증가하고 있다.

SMC 공정은 FRP를 금형에 고압으로 불어넣어 부재를 생산하는 방법으로, SMC FRP 부재는 1개의 금형에서 1개의 제품을 생산하는데 약 30분 정도가 소요되기 때문에 생산성이 뛰어나다. 그러나 SMC FRP는 주로 물탱크 등의 압력용기를 생산하는데 사용되며, 구조용 부재로 적용한 사례 및 관련 연구는 극히 미미하다. 따라서 수상 부유식 태양광발전 구조물에 사용되는 SMC FRP 수직재는 구조적 안전성을 검토하기 위한 별도의 연구가 수행되어야 한다.

또한 기존 연구(Lee et al., 2010; Choi et al., 2010; Choi et al., 2012)에서는 수상 부유식 태양광발전 구조물의 구조 안전성을 검토하기 위한 해석적 연구를 수행하였다. 유한요소해석은 태양광발전 구조물의 주요 하중인 풍하중, 적설하중 및 자중에 대한 정적 하중저항성능을 검토하였다. 그러나 볼트연결로 제작하는

수상 부유식 태양광발전 구조물의 특성상 반복하중에 의한 구조체의 안전성 및 볼트의 풀림현상 등에 대한 고찰이 반드시 이루어져야 한다.

이 연구에서는 기존 연구(Lee et al., 2010; Choi et al., 2010; Choi et al., 2012)들을 참고로 하여, 수상 부유식 태양광발전 구조물의 정적 거동을 평가하기 위한 유한요소해석과 동적 거동을 평가하기 위한 실험을 수행하였다. 또한 SMC FRP 수직재의 구조적 거동을 평가하기 위한 해석적, 실험적 연구를 수행하였다.

2. 수상 부유식 태양광발전 구조물의 거동 특성

2.1 정적 거동

정적 하중에 대한 수상 부유식 태양광발전 구조물의 안전성은 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS Civil 2012 (2012)를 사용하여 검토하였다. 단위구조물의 구조재는 프레임(frame) 요소, 태양광모듈은 판(plate) 요소를 사용하여 모델링하였으며, 해석모델의 PFRP 부재는 I-100×100×10×10, 사재는 L-50×60×8×8의 단면을 적용하였으며, SMC FRP 부재는 I-120×100×10×10이다. 또한, 구조 안전성은 AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials, 2001)에서 제시하고 있는 PFRP 부재의 안전율을 적용하여 허용응력설계법(Allowable Stress Design)으로 검토하였다. 유한요소해석 모델은 Fig. 3에 나타내었으며, 적용한 재료의 역학적 성질 및 허용응력은 Table 1, 2에 각각 나타내었다.



Fig. 3. FE Analysis Model of Floating PV Generation Structure

Table 1. Material Properties of FRP Members

Material	Elastic Modulus (GPa)	Tensile Strength (MPa)	Shear Strength (MPa)	Poisson's Ratio (ν , mm/mm)	Unit Weight (G, kN/m ³)
Pultruded FRP	33.28	402.58	79.20	0.25	18.42
SMC FRP	14.33	72.36	34.47	0.25	18.42

Table 2. Allowable Stress (AASHTO, 2001)

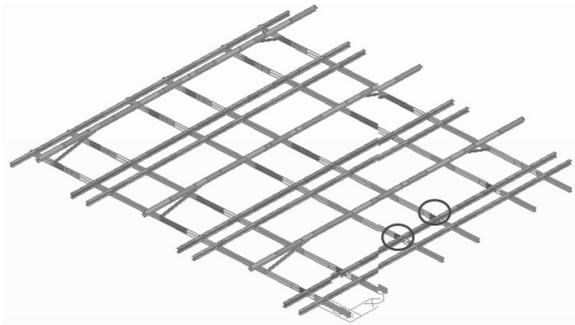
Material	Tensile Stress (MPa)	Compressive Stress (MPa)	Shear Stress (MPa)	Flexural Stress (MPa)
Pultruded FRP	201.29	134.19	26.40	161.03
SMC FRP	36.18	24.12	11.49	28.94
Safety Factor	2.0	3.0	3.0	2.5

Table 3. Applied Load

Load Case		Magnitude	Remark
Wind Load		4.39 kN/m ²	Design wind speed: 45 m/s
Snow Load		0.40 kN/m ²	
Crowd Load		4.90 kN/m ²	
Self Weight	Solar Module	254.97 N/EA	Size: 1,966 mm × 1,000 mm × 50 mm
	Floating System	0.69 kN/m ²	
	Foothold	0.12 kN/m ²	FRP Grating
	Inverter	1.96 kN	

Table 4. FE Analysis Results of Floating PV Generation Structure

Material		Tensile Stress	Compressive Stress	Shear Stress	Flexural Stress
Pultruded FRP	Maximum Stress (A, MPa)	1.32	1.79	12.60	25.86
	Allowable Stress (B, MPa)	201.29	134.19	26.40	161.03
	(A)/(B) (%)	0.66	1.33	47.73	16.06
	Remark	OK	OK	OK	OK
SMC FRP	Maximum Stress (A, MPa)	0.00	1.52	0.36	2.51
	Allowable Stress (B, MPa)	36.18	24.12	11.49	28.94
	(A)/(B) (%)	0.00	6.30	3.13	8.67
	Remark	OK	OK	OK	OK



(a) PFRP (Shear)



(b) SMC FRP (Flexural)

Fig. 4. Location of Maximum Stress

경계조건은 부유식 태양광발전 구조물의 위치를 결정하기 위한 계류의 위치를 단순지지로, 부유체가 위치한 부분의 절점은 부유체의 부력을 스프링계수로 치환한 탄성지점으로 가정하였으며, 유한요소해석 모델에 작용한 풍하중은 국내 유사 설계기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서 제시하고 있는 독립편지붕의 하중산정방법에 따라 국내 최대 설계기준풍속인 45m/s을 적용하여 구하였다. 풍하중을 비롯한 유한요소해석 모델의 작용하중은 Table 3에 나타내었다.

해석결과 허용응력에 대한 펄트루전 FRP 부재의 최대응력은 47.73%인 것으로 나타났으며, 펄트루전 FRP 부재의 설계는 전단

응력에 의해 지배되는 것으로 나타났다. 또한 허용응력에 대한 SMC FRP 부재의 최대응력은 8.67%로 나타났으며, 설계는 휨응력에 의해 지배되는 것으로 나타났다. 따라서 수상 부유식 태양광발전 구조물은 국내 최대 설계기준풍속 내에서 충분한 안전성을 확보하고 있음을 확인하였다. 유한요소해석 결과는 Table 4에 나타내었으며, 최대응력 발생 위치는 Fig. 4에 나타내었다.

2.2 동적 거동

동적 하중에 대한 수상 부유식 태양광발전 구조물의 안전성은 동적재하실험을 통해 조사하였다. 동적실험체는 Fig. 5에 나타낸

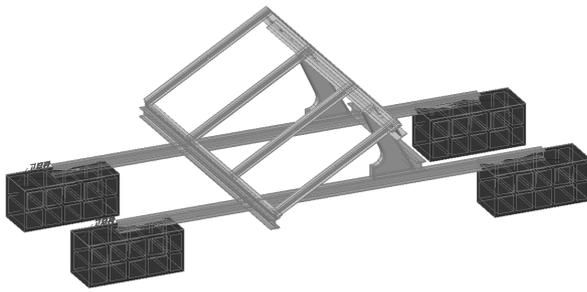


Fig. 5. Dynamic Test Specimen of Floating PV Generation Structure

것과 같이 기존의 수상 부유식 태양광발전 구조물의 내민보 부분을 모사하여 태양광모듈 3장을 배치할 수 있는 크기로 제작하였으며, 부재 치수 및 부재간의 간격은 실제 구조물과 동일하게 구성하였다. 또한, 실제 구조물에 설치된 태양광모듈의 도심에 하중이 재하되도록 강재 프레임을 설치하였다.

하중은 300kN 용량의 액츄에이터(Actuator)를 이용하여 실제 태양광모듈의 도심위치에 하중을 재하하였으며, 국내 유사 설계기준(Architectural Institute of Korea, 2009)에서 제시하고 있는 국내 최대 설계기준풍속인 45m/s에 해당하는 풍하중을 적용하여 15kN을 재하하였다. 또한 하중재하횟수는 2,000,000회이며, 재하 속도는 3.5Hz로 설정하였다.

동적실험체에 발생한 변위는 Fig. 5와 같이 하중재하방향(DOF 1)과 부력체 연결부재 중앙의 연직방향(DOF 2)에 대하여 측정하였다. 재하된 하중과 측정된 변위는 액츄에이터를 제어하는 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

수상 부유식 태양광발전 구조물은 볼트연결방식으로 구조물을 구성하였기 때문에 반복하중에 의한 볼트 풀림현상이 발생할 수 있다. 따라서 동적재하실험에서는 반복하중에 의한 볼트의 풀림현상을 파악하기 위해 실험 전후 볼트의 풀림토크(torque release)를 측정하였다. 풀림토크는 토크렌치를 사용하여 측정하였으며 Fig. 6에 나타낸 A, B, C 3구간에서 80Nm로 체결한 볼트에 대하여 총 5회 풀림토크를 측정하였다. 풀림토크 측정장비 및 측정과정은 Fig. 7에 나타내었다.

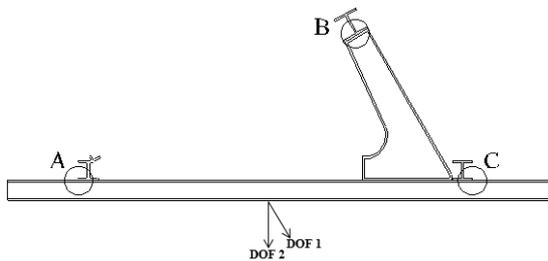


Fig. 6. Locations of Torque Release and Displacement Measurement

실험결과 각 부재와 연결부는 외적 손상이 발생하지 않았으며, 외관상의 볼트 변위 또한 발생하지 않았다. 따라서 수상 부유식 태양광발전 구조물은 동적 하중에 대하여 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났다.

구조물에 재하된 하중에 의한 변위의 발생주기 또한 비교적 일정하게 유지되었다. 따라서 동적 하중에 대하여 수상 부유식 태양광발전 구조물이 갖는 고유의 거동특성은 비교적 일정하게 유지되고 있는 것으로 생각된다. 또한, DOF 1와 DOF 2에 대한 시간이력곡선(hysteresis curve)은 에너지 소산 없이 거동하였다. 따라서 수상 부유식 태양광발전 구조물은 반복되는 풍하중에 대해 선형탄성거동을 하며, 구조적 성능이 저하되지 않을 것으로 생각된다. 실험결과 중 반복횟수에 따른 DOF 1와 DOF 2에 대한 변위-하



Fig. 7. Torque Wrench and Torque Release Measurement

중 관계는 0~1,000회, 10,000~11,000회, 100,000~101,000회, 500,000~501,000회, 1,000,000~1,001,000회, 1,999,000~2,000,000 회에 대하여 검토하여 각각 Figs. 8~13에 정리하였다.

2,000,000회 하중 재하 후 볼트의 풀림토크는 실험 전과 비교하여 A구간 7%, B구간 1%, C구간 5%의 감소율을 나타내었으며,

풀림토크의 최대감소량은 약 1.4Nm로 나타났다. 따라서 반복하중이 재하된 후 연결부의 풀림토크는 충분한 구조성능을 확보하고 있는 것으로 나타났다. 실험 전후의 각 구간의 풀림토크는 Table 5에 나타내었다.

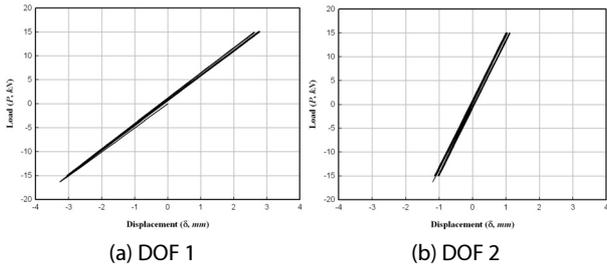


Fig. 8. Hysteresis Curve In the Range of 0 to 1,000 Cycles

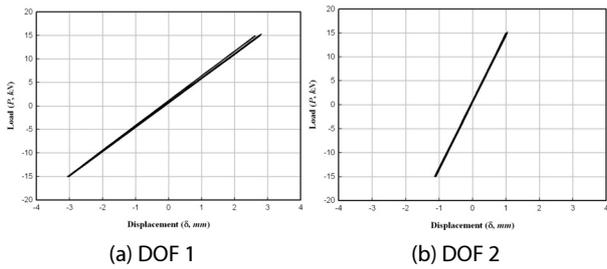


Fig. 9. Hysteresis Curve In the range of 10,000 to 11,000 Cycles

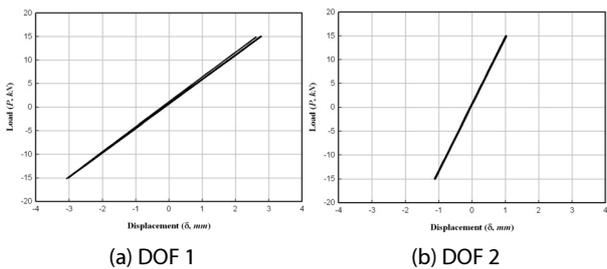


Fig. 10. Hysteresis Curve in the Range of 100,000 to 101,000 Cycles

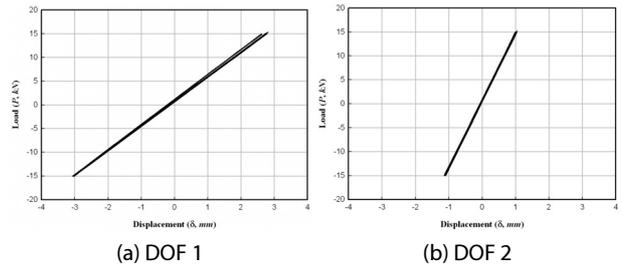


Fig. 11. Hysteresis Curve in the Range of 500,000 to 501,000 Cycles

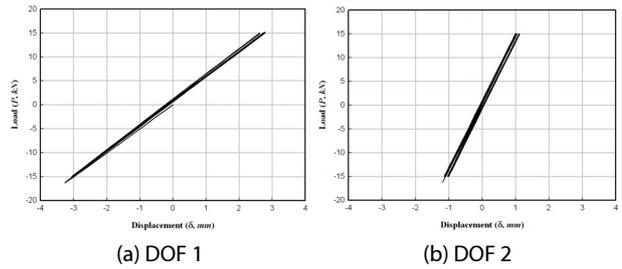


Fig. 12. Hysteresis Curve in the Range of 1,000,000 to 1,001,000 Cycles

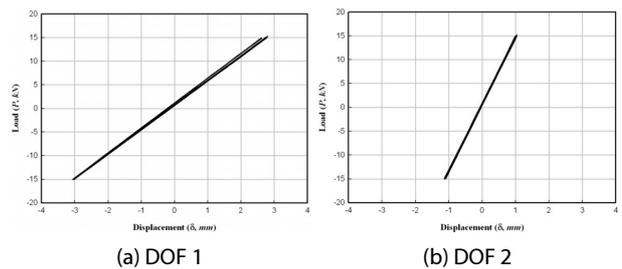


Fig. 13. Hysteresis Curve In the Range of 1,999,000 to 2,000,000 Cycles

Table 5. Measurement Results of Torque Release

Location (Refer to Fig. 5)	Time of Measurement	Torque Release (Nm)						
		1	2	3	4	5	Average	Difference (%)
A	Before	20	20	19	20	21	20.0	7.0
	After	19	18	19	17	19	18.6	
B	Before	20	20	20	20	20	20.0	1.0
	After	19	20	20	20	20	19.8	
C	Before	20	19	20	20	21	20.0	5.0
	After	19	18	19	19	20	19.0	

3. SMC FRP 수직재

3.1 유한요소해석

SMC FRP 수직재는 태양광모듈에 재하되는 풍하중을 압축성능을 통해 저항하는 역할을 한다. 기존 연구(Choi et al., 2013)에서는 Fig. 14에 나타낸 SMC FRP 수직재를 제안하였다. 또한 프레임 요소를 사용한 수상 부유식 태양광발전 구조물의 유한요소해석 모델은 SMC FRP 수직재의 형태적 특성을 정확히 반영하지 못하기 때문에 판요소를 이용한 추가적인 유한요소해석을 수행한 바 있다.

이 연구에서는 안정성 향상을 위해 Fig. 14에 나타낸 SMC FRP 수직재를 개선하여 변단면으로 제작한 SMC FRP 수직재를 Fig. 15와 같이 제안하였다. 또한, Fig. 3에 나타낸 유한요소해석으로부터 얻은 SMC FRP 수직재의 부재력에 대한 안전성을 검토하기 위한 유한요소해석을 수행하였으며, 태양광모듈에 직각으로 작용하는 풍하중에 대한 하중 ①과 전면에 대한 태양광모듈의 투영면적



Fig. 14. Vertical Member Made by SMC Process (Choi et al., 2013)



Fig. 15. Modified SMC FRP Vertical Member

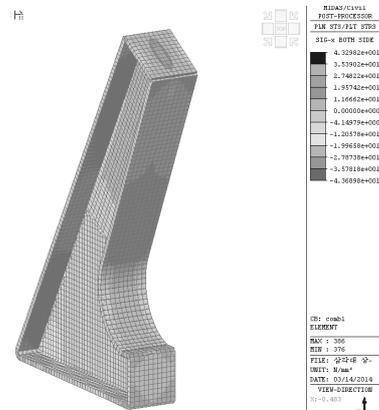


Fig. 16. FE Analysis Model of SMC FRP Vertical Member

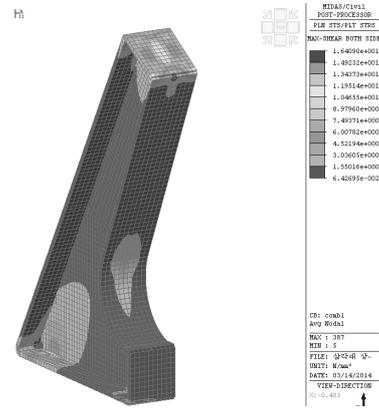
에 작용하는 풍하중에 대한 하중 ②로 구분하여 좌굴해석을 수행한 후 부재력과 비교하여 좌굴안정성을 검토하였다. 개선한 SMC FRP 수직재의 유한요소해석 모델은 Fig. 16에 나타내었다.

Fig. 15에 나타낸 SMC FRP 수직재는 횡방향 하중이 재하될 경우 휨모멘트에 대한 저항성능을 향상시키기 위한 리브를 설치하였다. 그러나 SMC FRP 수직재 내의 리브는 압축저항성능에는 큰 기여를 하지 못할 것으로 판단된다. 따라서 Fig. 16의 유한요소해석 모델은 리브를 고려하지 않았다. 경계조건은 SMC FRP 수직재의 볼트접합 위치를 단순지지로 가정하였으며, 볼트 간격은 플랜지 폭방향으로 20mm, 길이방향으로 30mm 간격으로 전후 좌우 2개씩 총 8개를 배치하였다. 또한 해석에 적용한 재료의 역학적 성질은 Table 1과 동일하다.

정적 해석결과, SMC FRP 수직재의 최대면내응력은 경계조건(볼트)에서 발생하였고, 43.69 MPa로 인장강도에 비해 60.38%인 것으로 나타났다. 또한, 최대전단응력 또한 경계조건(볼트)에서 발생하였고, 9.15 MPa로 전단강도에 비해 47.61%인 것으로 나타났다. 따라서 SMC FRP 수직재는 구조적으로 안전한 것으로 나타났다. SMC FRP 수직재의 응력분포는 Fig. 17에 나타내었다.



(a) Inplane



(b) Shear

Fig. 17. Stress Distribution of SMC FRP Vertical Member

Table 6. Static Analysis Results of SMC FRP Vertical Member

Stress	Inplane	Shear
Maximum Stress (A, MPa)	43.69	16.41
Material Strength (B, MPa)	72.36	34.47
(A)/(B) (%)	60.38	47.61

Table 7. Buckling Analysis Results of SMC FRP Vertical Member

Load Case	Member Load (kN)	Buckling Load (kN)	Buckling Mode	Remark
Load ①	18.86	19.59	Global Buckling	OK
Load ②	1.42	17.98	Global Buckling (Torsional Buckling)	OK

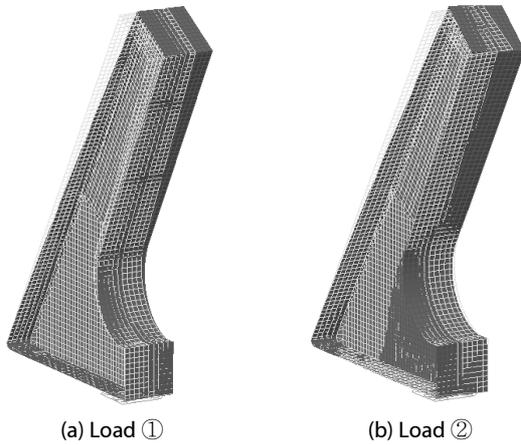


Fig. 18. Buckling Mode Shape of SMC FRP Vertical Member

좌굴 해석결과, 하중 ①과 ②에 대한 좌굴모드는 전체좌굴(Global buckling)로 나타났으며, 특히 하중 ②에 대한 좌굴모드는 단면 내에서 회전이 발생하는 비틀림좌굴(Torsional buckling)로 나타났다. 또한, 좌굴하중은 유한요소해석 결과로 구한 부재력보다 크게 나타났다. 따라서 SMC FRP 수직재는 수상 부유식 태양광발전 구조물 내에서 좌굴안정성을 확보하고 있는 것으로 나타났다. SMC FRP 수직재의 정적 해석결과와 좌굴 해석결과는 Table 6, 7에 각각 나타내었으며, 좌굴모드는 하중 ①, ②에 대하여 Fig. 18에 나타내었다.

3.2 인발 및 압축 실험

이 연구에서는 SMC FRP 수직재의 구조적 거동을 평가하기 위하여 풍하중의 재하방향에 따른 인발 및 압축 실험을 실시하였다. 인발실험체는 부력체 연결부재와의 볼트연결 방식을 반영하기 위해 펄트루전 FRP 부재와 연결하였으며, 압축실험체는 강재와 연결하여 SMC FRP 수직재만의 압축거동을 분석할 수 있도록 구성하였



(a) Pullout Test



(b) Compression Test

Fig. 19. SMC FRP Vertical Member Specimens

다. 또한 각 실험체는 수상 부유식 태양광발전 구조물의 시공에 사용하는 것과 동일한 직경 10mm인 볼트 8개를 사용하여 연결하였다. 각 실험체의 형상은 Fig. 19에 나타내었다.

하중은 300kN 용량의 액츄에이터를 SMC FRP 수직재의 상부에 수직방향으로 하중이 재하되도록 설치하여 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였다. 또한 재하된 하중과 변위는 액츄에이터를 제어하는 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

실험결과, 각 실험체의 파괴 형상은 Fig. 20에 나타내었다. 인발 실험 결과 실험체는 PFRP 부재의 상부플랜지와 부부의 접합부에서 길이방향으로 파괴되었으며, 파괴하중은 약 21.89kN으로 나타났다. 또한 압축실험 결과 SMC FRP 수직재는 전체좌굴이 발생하였고 그림 Fig. 20(b)의 “A”부분과 “B”부분의 사이에서 균열이 발생하며 파괴되었으며 파괴하중은 65.54kN으로 나타났다. 따라

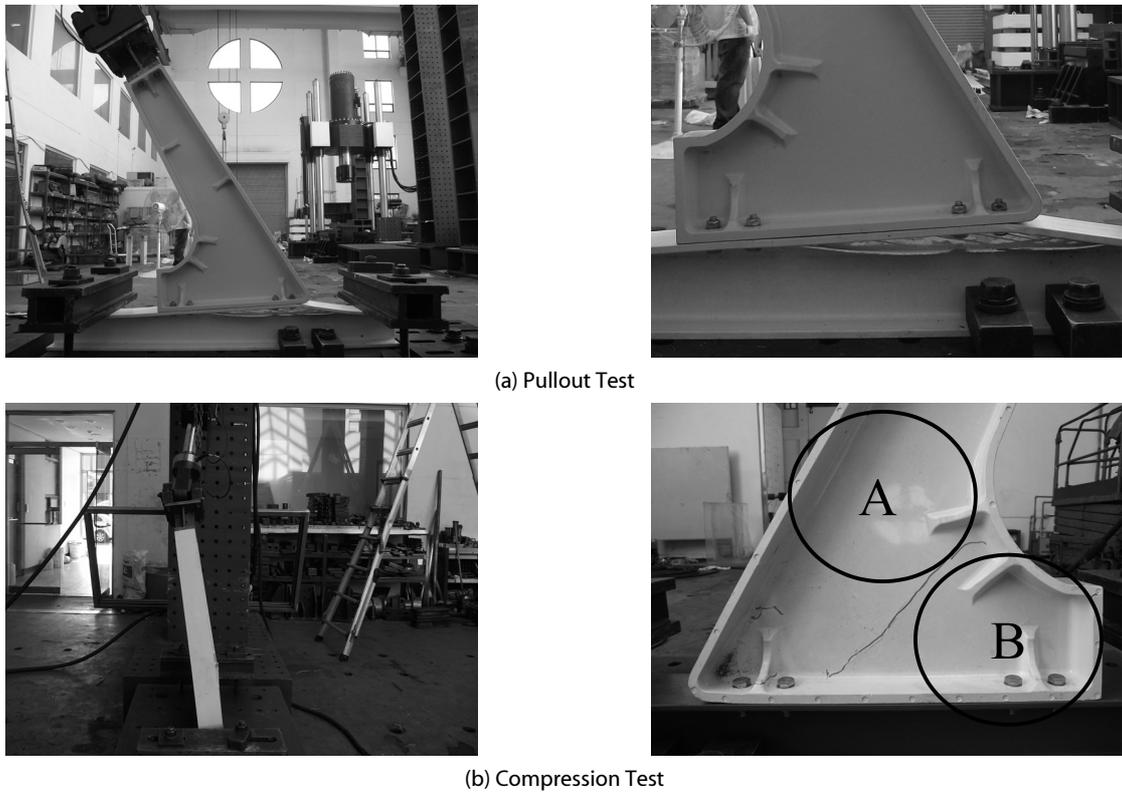


Fig. 20. Failure Mode of SMC FRP Vertical Member

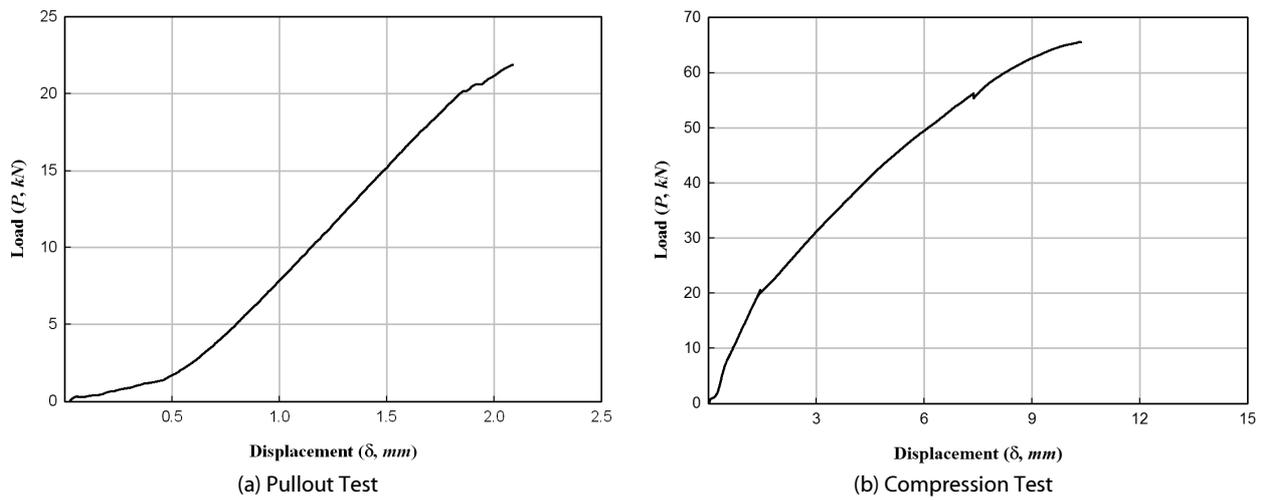


Fig. 21. Load-Displacement Relationship

Table 8. Buckling Analysis Results of SMC FRP Vertical Member

Test	Failure Load (①, kN)	Member Load of FEM (②, kN)	①/②	Remark
Pullout Test	21.89	17.57	1.25	OK
Compression Test	65.54	18.86	3.48	OK

서 유한요소해석을 통해 얻은 부재력(18.86 kN)보다 인발강도는 약 1.16배, 압축강도는 약 3.48배 큰 것으로 나타났다. 각 실험의 하중-변위 곡선은 Fig. 21에 나타내었으며, 실험결과는 유한요소해석 결과와 비교하여 Table 8에 정리하였다.

4. 결론

이 연구에서는 수상 부유식 태양광발전 구조물의 구조성능을 파악하기 위한 해석적, 실험적 연구를 수행하였다. 수상 부유식 태양광발전 구조물은 최대 설계기본풍속인 45 m/s 를 기준으로 한 풍하중에 대하여 하중저항성능을 평가하였으며, 유한요소해석을 통해 정적거동, 실험을 통해 동적거동을 각각 평가하였다. 해석결과 수상 부유식 태양광발전 구조물의 최대응력은 허용응력의 약 47.73%에 해당하여 안전성을 확보하고 있었다. 또한, 실험결과 구조물은 선형탄성에 가까운 거동을 하고, 에너지 손실이 거의 발생하지 않았으며, 2백만회 반복재하실험 후 볼트의 풀림토크 또한 최대 7% (1.4 Nm) 이하로 감소하였다. 따라서 수상 부유식 태양광발전 구조물은 설계하중에 대하여 충분한 안전성을 확보하고 있는 것으로 판단되며, 볼트는 수상 환경에서 구조성능을 유지하기에 적절한 토크를 확보하고 있는 것으로 생각된다. 또한 직경이 큰 와서를 사용하는 방법 등을 적용한다면 볼트연결부의 풀림현상을 더욱 감소시킬 수 있을 것으로 생각된다.

또한 SMC FRP 수직재의 구조적 성능을 검토하기 위한 유한요소해석 결과, 최대응력은 재료의 강도에 약 60.38%에 해당하였으며, 좌굴에 대한 안정성 또한 확보하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 실험결과 인발 및 압축에 대하여 각각 1.16배, 3.48배의 여유강도를 확보하고 있는 것으로 나타났다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (2001). *A policy on geometric design of highway and streets*, Washington D. C.
- Choi, H., Joo, H. J., Nam, J. H., Kim, K. S. and Yoon, S. J. (2010). "Structural design for the development of the floating type photovoltaic energy generation system." *Material Science Forum*, Vol. 654-656, pp. 2803-2806.
- Choi, J. W., Joo, H. J., Nam, J. H., Hwang, S. T. and Yoon, S. J. (2013). "Performance enhancement of floating PV generation structure using FRP." *Composites Research*, Vol. 26, No. 2, pp. 105-110 (in Korean).
- Joo, H. J., Lee, N. Y. and Lee, S. W. (2013). "Floating photovoltaic power generation system." *The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 4, No. 4, pp. 31-39 (in Korean).
- Lee, Y. G., Joo, H. J., Nam, J. H. and Yoon, S. J. (2010). "Modified design of floating type photovoltaic energy generation system." *Journal of Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 1, No. 4, pp. 18-27 (in Korean).
- MIDAS Information Technology Co., Ltd. (2012). *Analysis reference*, Korea (In Korean).
- Statistics Korea (2013). Available at: <http://www.index.com>.
- Yoon, S. J. (2013). "Estimation of structural behavior of floating power generation system." *Research Report*, Hongik University Institute of Science and Technology, Korea (in Korean).