

FRP를 활용한 부유식 태양광발전 구조시스템의 성능 향상

최진우* · 주형중** · 남정훈*** · 황성태*** · 윤순종*†

Performance Enhancement of Floating PV Generation Structure Using FRP

Jin-Woo Choi*, Hyung-Joong Joo**, Jeong-Hun Nam***, Seong-Tae Hwang***, Soon-Jong Yoon*†

ABSTRACT: In this study, we suggest the new floating PV generation structure which is improved the structural and economical efficiency compared with the system developed in the previous research. Pultruded FRP has superior physical and chemical material properties compared with those of conventional structural materials. Especially, pultruded FRP has an excellent corrosion-resistance, light-weight, and it also has high specific strength and stiffness which are highly appreciated for the design and fabrication of floating PV generation structure under harsh environmental condition. In this study, structural analysis using the finite element method has been performed to investigate the safety of new floating PV generation structure and newly applied structural members.

초 록: 이 연구에서는 기존의 부유식 태양광발전 구조시스템의 형태와 비교했을 때 구조적, 경제적인 면에서 향상된 새로운 형식의 부유식 태양광발전 구조물을 제안하였다. 펄트루전 FRP는 다른 일반적인 구조 재료들에 비해 좋은 재료의 물리적, 화학적 성질을 가지고 있다. 특히, 펄트루전 FRP는 내부식성, 경량성, 비강도 및 비강성이 뛰어나기 때문에 유해한 환경에 설치되는 부유식 태양광발전 구조물을 설계하고 제작하는데 매우 적합한 재료이다. 이 연구에서는 새로운 형식의 부유식 태양광발전 구조물과 새롭게 적용된 구조부재에 대한 안전성을 검토하기 위하여 유한요소법을 적용한 구조해석을 수행하였다.

Key Words: 부유식 태양광발전 구조물(floating PV generation structure), 섬유강화플라스틱(fiber reinforced polymeric plastic), 펄트루전 FRP(pultruded FRP), SMC(sheet molding compound), 유한요소해석(the finite element method)

1. 서 론

태양광발전은 화석연료를 대체할 차세대 에너지원으로 전세계적으로 각광받고 있다. 일본에서는 후쿠시마 원전사고 이후 태양광 및 풍력 발전의 지원을 위한 신재생에너지법을 제정하였고, 국내에서는 대단위의 태양광발전소의 시공이 이루어지고 있다. 그러나 관련 연구는 대다수가 태양

광모듈의 성능 향상에 국한되어 있고, 태양광모듈을 지지하는 구조형식에 대한 연구는 실질적으로 미미하여 경제성 확보에 문제가 있다.

한편, 국내에서는 최근 내구성이 우수하고, 수변 및 해양 환경에서 내부식성이 뛰어난 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced polymer plastic, FRP)을 이용한 부유식 태양광발전 구조물에 대한 연구가 진행되었으며, 그 결과 해상, 강, 댐 등

접수: 2012년 12월 05일, 수정: 2013년 1월 02일, 게재승인: 2013년 1월 22일

*홍익대학교 토목공학과

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

**㈜아이시스이엔씨

***㈜신화이엔이

의 유희수면을 효율적으로 사용할 수 있고, 대규모 토공사로 인한 환경훼손을 방지할 수 있으며, 국가의 차세대 에너지 지원을 확보하기 위한 사업이 진행 중에 있다.

이 연구에서는 기존 연구[2-4]에서 제안하였던 부유식 태양광발전 구조물 형식의 구조적 성능, 시공성 및 경제성을 개선한 부유식 태양광발전 구조물을 제안하였다. 이 연구에서 제안한 부유식 태양광발전 구조물은 기존 구조물의 하중전달 메커니즘을 개선하여 구조물을 구성하는 모든 부재가 외부하중에 저항할 수 있도록 구성되어 있으며, 유한요소해석을 통해 구조물 전체와 새롭게 제안한 구조부재에 대한 하중저항성능을 검토하였다.

2. 부유식 태양광발전 구조물의 구조개선

기존 연구에서 제안한 부유식 태양광발전 구조물(E-type)은 유리섬유(Glass-fiber)와 폴리에스터(Polyester) 수지를 사용하여 생산한 펠트루전 FRP를 사용하였으며, 태양광모듈 연결부재와 태양광모듈을 경사 배치할 수 있도록 구성한 삼각대를 이용한 하중전달 메커니즘을 도입하였다. 또한 삼각대와 부력체를 연결하기 위한 부재 및 태양광모듈의 유지관리를 위한 발판 연결부재 및 사재가 도입되었다. 기존 부유식 태양광발전 구조물의 형태는 Fig. 1에 나타내었다[1].

Fig. 1에서 Unit 2는 Unit 1의 구조부재수를 줄여 경제성을 개선한 부유식 태양광발전 구조물이다[1,3]. Unit 2는 Unit 1의 부유체의 방향을 직각으로 전환하여 구조부재의 수를 감소시켰으며, 태양광모듈의 배치를 1단으로 변경하여 구조물에 재하되는 주요 하중인 풍하중을 감소시켰다. 그러



(a) Unit 1



(b) Unit 2

Fig. 1. Previous floating PV generation system[1,3].

나 태양광모듈에 재하되는 풍하중에 대한 저항성능은 Fig. 2(a)에 나타낸 것과 같이 주로 태양광모듈 연결부재와 삼각대에 의존하게 되며, 발판 및 부력체 연결부재들은 하중저항성능에 큰 기여를 하지 못한다.

이 연구에서 제안한 부유식 태양광발전 구조물(N-type)은 기존의 발판 부재가 태양광모듈에 의해 풍하중에 저항할 수 있도록 형태를 개선하였다. 즉, 태양광모듈 연결부재

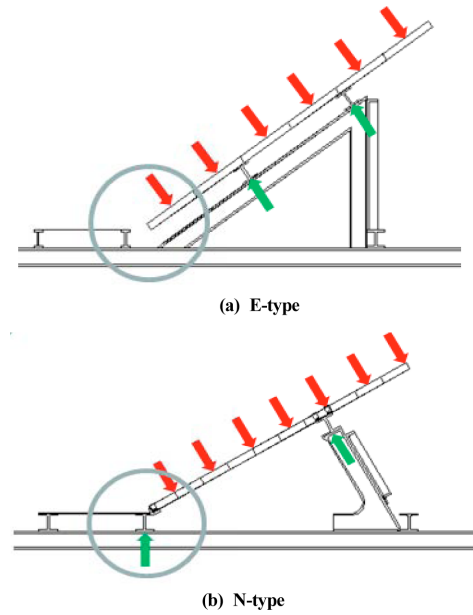


Fig. 2. Wind load resistance mechanism.

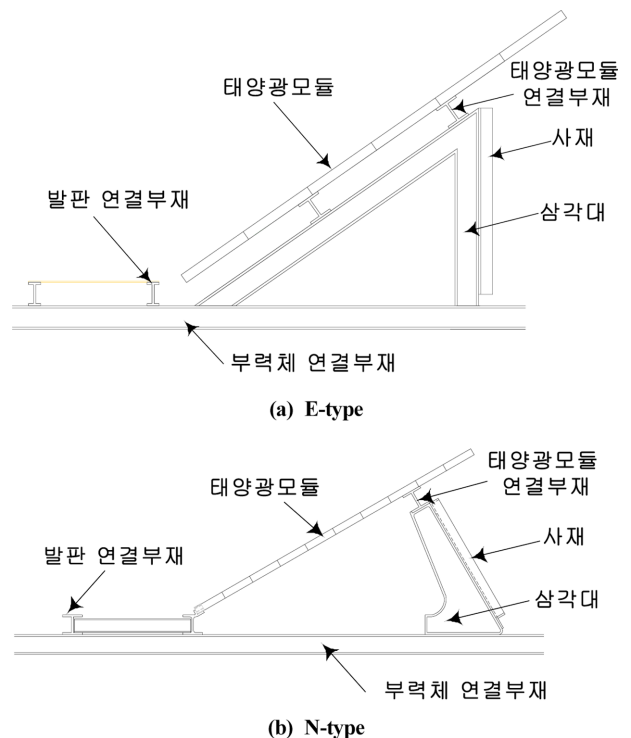


Fig. 3. Side view of floating PV generation system[5].

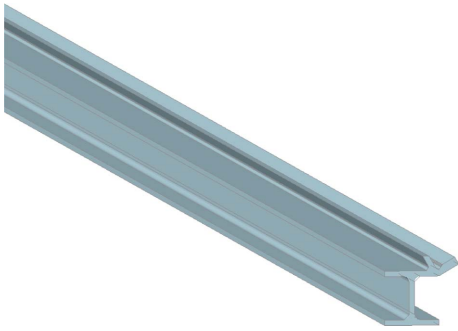


Fig. 4. Main load resisting member (stool member).

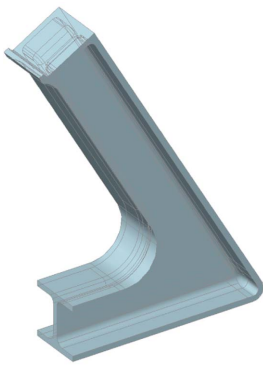


Fig. 5. Compression member made by SMC process.

와 발판 연결부재를 이용하여 태양광모듈을 고정하므로서 Fig. 2(b)에 나타낸 바와 같이 전체 구조물이 풍하중에 함께 저항할 수 있도록 설계하였다. 또한, 삼각대를 대신하여 태양광모듈에 수직으로 기둥부재를 도입하였다. 기둥부재는 SMC(Sheet Molding Compound) 공정으로 제조하며, 태양광모듈에 재하되는 풍하중이 압축력으로 작용하도록 구성되어 있다. 기존 부유식 태양광발전 구조시스템과 이 연구에서 제안한 부유식 태양광발전 구조시스템의 형태 차이는 Fig. 3에 나타내었다[5].

SMC는 금형에 FRP를 고압으로 붙여내어 제품을 찍어내는 FRP의 제작공정으로서 주로 물탱크 등을 제작하는데 적용하고 있다. SMC로 제작한 FRP 제품은 1개의 금형으로 1개의 제품을 생산하는데 약 30분 정도 소요되기 때문에 생산성이 뛰어나다. 또한, 부유식 태양광발전 구조물의 삼각대를 대체할 압축재를 제작할 경우 E-type을 제작할 때 필요한 볼트 수를 크게 줄일 수 있기 때문에 시공성을 향상시킬 수 있다. 기존 구조시스템의 하중저항성능을 개선하기 위해 도입한 발판부재(주요부재)와 SMC 공정으로 제작한 압축재는 Figs. 4, 5에 각각 나타내었다.

3. 유한요소해석

N-type은 E-type의 구조성능을 개선한 부유식 태양광발전 구조시스템으로서, Figs. 3, 4에 나타낸 발판부재와 SMC

압축재를 도입하였다. 따라서, 이 연구에서는 특정조건에 대한 N-type과 E-type의 하중전달 매커니즘의 효율을 파악하기 위한 유한요소해석을 수행하였다.

발판부재는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 태양광모듈을 연결하기 위하여 상부플랜지 끝에 별도의 가이드를 설치하였으며, 태양광모듈에 재하되는 하중은 주로 가이드에 직접 재하된다. 또한, SMC 압축재는 압축력이 재하되는 부재이기 때문에 좌굴에 대한 영향을 검토하여야 한다. 따라서 이 연구에서는 발판부재와 SMC 압축재의 상세 유한요소해석을 수행하여 두 부재의 적용성을 평가하였다.

전체 구조시스템과 발판부재 및 SMC 압축재의 구조성능을 파악하기 위한 유한요소해석은 범용 유한요소해석 프로그램 중 하나인 MIDAS Civil 2006을 사용하였다[6].

3.1 N-type과 E-type의 성능 비교

N-type과 E-type의 유한요소해석 모델은 3차원 프레임 요소를 적용하였으며, 모델의 형상 및 재료의 역학적 성질은 Fig. 6, Table 1에 각각 나타내었다. Table 1에 나타낸 재료의 역학적 성질은 상온상태에서 수행한 펄트루전 FRP의 인장 시험을 통해 얻은 결과이다.

유한요소해석 모델은 태양광모듈 11장을 3열로 총 33장(980 × 1,619 mm, 230 W × 33장 = 7.59 kW)이 배치되도록 구성하였으며, 경계조건은 부유식 태양광발전 구조물의 위치를 고정하기 위한 계류시스템 설치 위치를 단순지지로, 부

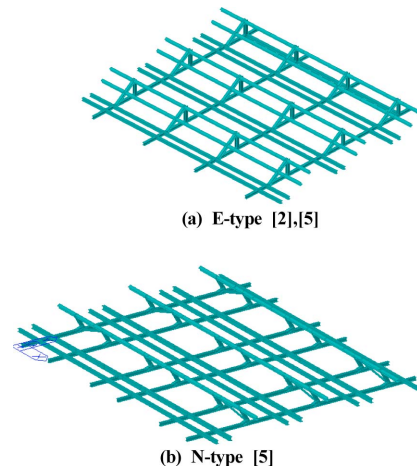


Fig. 6. FE analysis model of floating PV generation structure.

Table 1. Material properties [5]

Material		Elastic Moduli (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Density
PFRP	I-shape	33.28	0.25	402.58	1.88
	L-shape	38.17	0.36	521.53	
SMC		14.33	0.25	80.00	

유체가 위치한 부분의 절점은 부유체의 부력을 이용한 탄성지점으로 가정하였다. 유한요소해석 모델에 적용한 풍하중은 설계풍속 50 m/s를 기준으로 작용시켰으며, 기타 하중은 Table 2와 같이 작용시켰다.

유한요소해석 결과 N-type은 E-type에 비해 구조물을 구성하는 전 부재가 재하되는 하중에 고르게 저항하는 것으로 나타났다. 따라서, N-type은 E-type에 비해 부재수를 줄여 경제성을 확보할 수 있으며, 구조물의 하중저항성능을 향상시켜 효율적인 구조물을 제작하고, 예기치 않은 큰 하

Table 2. Load composition [5]

Load case		Load
Wind load		4.35 kN/m ²
Self-weight	PV module	220.73 N/EA
	Pontoon	392.00 N/m
	Stool	0.41 N/m

Table 3. Comparison of FE analysis results [5]

Member	N-type (MPa)	E-type (MPa)
①	54.46	114.41
②	18.66	16.24
③	30.50	27.36
④	17.63	126.71
⑤	15.59	31.47

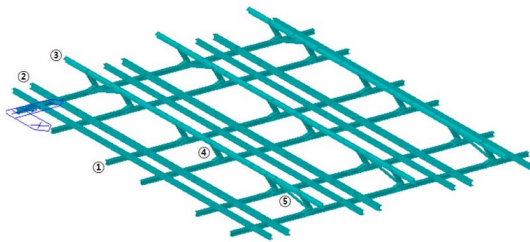


Fig. 7. Member designation [5].

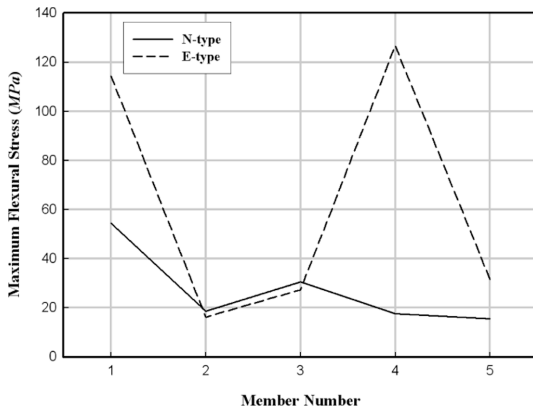


Fig. 8. Maximum flexural stress [5].

중이 작용할 경우를 대비한 안전을 또한 확보하였다. N-type과 E-type의 유한요소해석 결과, N-type과 E-type의 최대휨응력은 Table 3에 정리하였다. Table 3에 나타난 각 부재의 분류는 Fig. 7에 나타내었으며, 분류한 부재 종류별 최대휨응력분포는 Fig. 8에 나타내었다.

3.2 발판부재의 상세해석

발판부재의 유한요소해석은 판요소를 이용하여 수행하였으며, 경계조건은 Fig. 9에 나타난 바와 같이 발판부재의 부력체 위치에 따라 길이방향으로 단순지지, 부력체의 부력을 스프링계수로 치환한 탄성지점, 자유단 순서로 총 3 구간을 설정하여 부재에 불리한 하중조건을 형성하였다. 하중은 N-type의 구조해석 결과 발판부재에 재하되는 면내 하중을 가이드에 재하시켰다. 또한, Table 1에 나타난 펄트루전 FRP I형 단면 부재의 역학적 성질을 적용하였다. 발판부재의 유한요소해석 모델은 Fig. 10에 나타내었다.

해석결과, 발판부재에 작용하는 응력은 펄트루전 FRP의 휨강도(402.60 MPa)와 전단강도(79.11 MPa)보다 작게 발생하였으며, 따라서, 별도의 보강재 없이 발판부재의 국부적인 파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 유한요소해석 결과는 Table 4에 나타내었으며, 발판부재 내에 발생하는 휨응력 및 전단응력 분포와 치짐형상은 Figs. 11, 12에 각각 나타내었다.

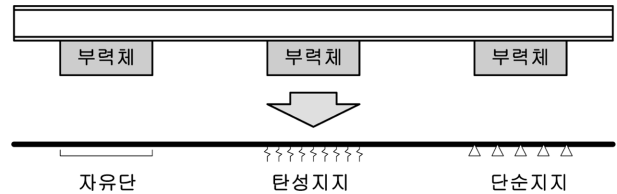


Fig. 9. Boundary condition.

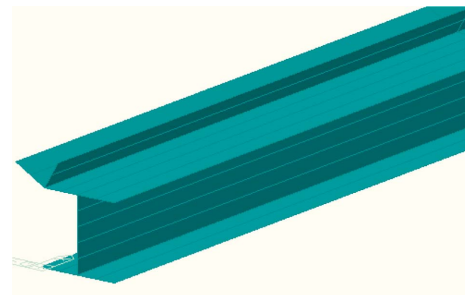


Fig. 10. FE analysis model of stool member.

Table 4. FE analysis results of stool member

Case	Flexure	Shear
Maximum stress (MPa)	158.78	27.43
Strength (MPa)	402.60	79.11
Remark	OK	OK

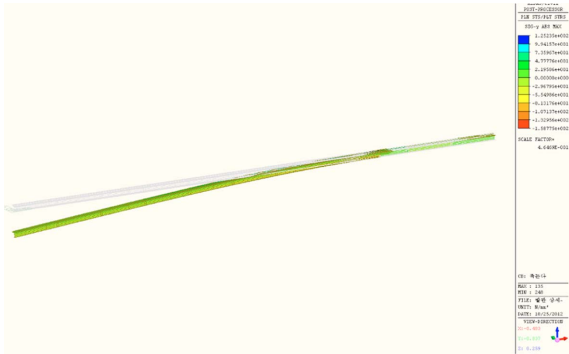


Fig. 11. Flexural stress of stool member.



Fig. 12. Shear stress of stool member.

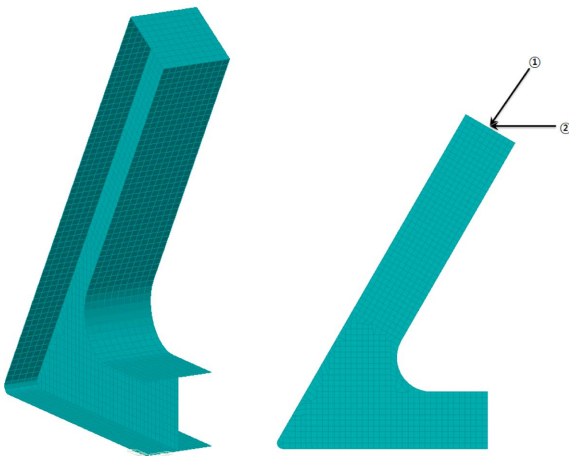


Fig. 13. FE analysis model of SMC compression member.

Table 5. Buckling analysis results of SMC compression member

Load Case	Load ①	Load ②
Member load (kN)	10.40	0.78
Buckling load (kN)	21.47	18.60
Buckling mode	Global buckling	Global buckling (Torsional buckling)
Remark	OK	OK

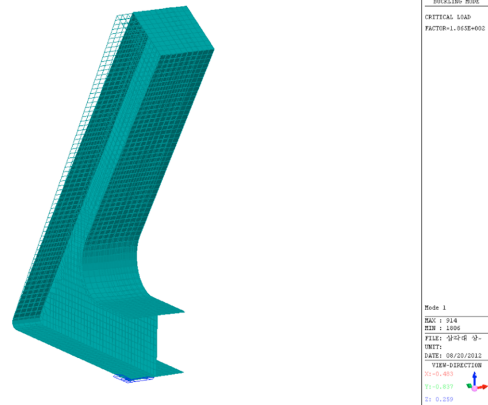


Fig. 14. Buckling mode shape about load ① .

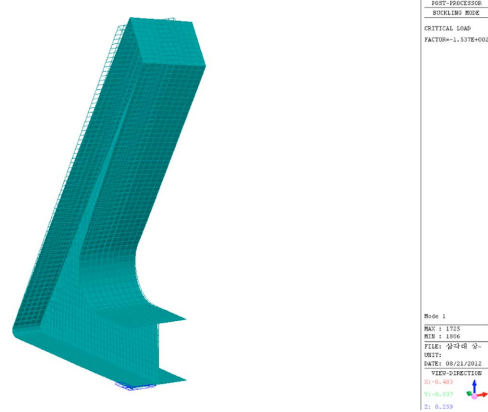


Fig. 15. Buckling mode shape about load ②.

3.3 SMC 압축재의 좌굴해석

SMC 압축재의 좌굴해석은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 판 요소로 모델링한 유한요소해석 모델에 대해 부재 길이방향과 횡방향으로 하중을 재하하였으며, N-type의 구조해석 결과에서 얻은 최대하중과 비교하여 좌굴안정성을 검토하였다. 볼트 간격은 플랜지 폭방향으로 20 mm, 길이방향으로 30 mm 간격으로 전후좌우 2개씩 총 8개를 배치하였다. 또한, 해석에 적용한 재료의 역학적 성질은 Table 1에 나타난 것과 같다.

좌굴해석결과, 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 N-type의 유한요소해석 결과로 나타난 부재력보다 크게 나타났다. 즉, 부재에 좌굴이 발생하기 전에 파괴가 일어나므로 좌굴은 발생하지 않는다. 따라서, SMC 압축재는 풍속 50 m/s 내에서는 좌굴에 대하여 안전할 것으로 판단된다. SMC 압축재의 좌굴해석결과는 Table 5에 나타내었으며, 좌굴모드는 하중 ①, ②에 대하여 Figs. 14, 15에 각각 나타내었다.

4. 결 론

이 연구에서는 기존 연구에서 제안하였던 부유식 태양광발전 구조시스템의 구조적 성능 및 시공성, 경제성을 개선한 새로운 형식의 부유식 태양광발전 구조시스템을 제안하였다. 이 연구에서 제안한 부유식 태양광발전 구조시스템은 발판부재를 이용하여 태양광모듈을 지지함으로써 구조물을 구성하는 모든 부재가 구조물의 하중저항성능에 기여하도록 구성되어 있으며, 기존의 삼각부재 대신 SMC 공정으로 제작한 압축재를 도입하여 시공성과 경제성을 개선하였다.

또한, 구조물의 구조성능을 확인하기 위해 구조물 전체 뿐만 아니라, 발판부재, SMC 압축재에 대한 유한요소해석을 수행하였다. 구조해석 결과 새롭게 제안한 부유식 태양광발전 구조시스템은 기존 구조시스템보다 뛰어난 하중전달능력을 확인하였으며, 발판부재와 SMC 압축재는 각각의 요구되는 구조성능을 확보하고 있음을 확인하였다.

FRP를 이용한 부유식 태양광발전 구조물은 모든 부재를 볼트로 연결하여 제작하기 때문에 구조부재의 강도에 대한 신뢰성 및 시공성을 개선하기 위해서는 볼트 연결부를 감소시키는 것이 가장 효과적이다. 따라서, 이 논문에서 제시한 구조시스템을 개선하여 내구성, 경제성, 시공성을 추가적으로 확보할 수 있는 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다.

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 Symposium*, 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 Symposium*, Korean Society for 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. Nam, J.H., *Development of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System Using Pultruded Structural Members*, Ph. D. Thesis, Hongik University, 2011.
5. Choi, J.W., Joo, H.J., Nam, J.H., Hwang, S.T., and Yoon, S.J., "A Study on the Improvement of Structural System for the Floating Type Photovoltaic Energy Generation System," *Proceeding of the 2012 Fall Symposium*, Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, Jeju, Korea, November, 2012, pp. 77-80.
6. MIDAS Information Technology Co., Ltd., "Analysis Reference," 2006.