

FRP를 활용한 수상 부유식 태양광발전 구조물의 요소기술 개발

서수홍* · 최진우* · 주형중* · 남정훈* · 윤순종**†

Development of Element Technique for the Floating PV Generation Structure Using FRP

Su-Hong Seo*, Jin-Woo Choi*, Hyung-Joong Joo*, Jeong-Hun Nam*, Soon-Jong Yoon**†

ABSTRACT: Fiber reinforced polymer plastic (FRP) structural members are recently available in construction industries due to various material properties such as high specific strength and stiffness, light-weight, and corrosion-resistance. The floating PV generation structure can also be an illustration for applying FRP in construction applications. The floating PV generation structure has been recently issued as a representative item for the low carbon and green growth campaign and many related studies have been conducted for the structural safety and commercial viability. Moreover, the floating PV generation structures for the commercial purpose have been constructed. In this paper, the investigation and development processes of elements for the floating PV generation structure are presented during commercialization.

초 록: 섬유강화복합재는 단위중량당 강도와 강성이 뛰어나고, 단위중량이 작으며, 내부식성이 뛰어난 점 등의 다양한 재료성질의 장점이 있는 재료로서 건설분야에 적용이 점차 증가하고 있으며, 섬유강화복합재의 건설분야에 활용한 예로 수상 부유식 태양광발전 구조물이 있다. 수상 부유식 태양광발전 구조물은 최근 저탄소 녹색성장의 대표적인 사례로 각광받고 있으며, 안전성 및 경제성을 확보하기 위한 연구가 다수 진행되었다. 또한 수상 부유식 태양광발전 구조물은 최근 국내에 상용화 단지가 시공되었다. 본 논문에서는 상용화 과정에서 경제성 및 시공성을 위해 개발된 수상 부유식 태양광발전 구조물의 요소기술의 연구 개발 내용을 제시하였다

Key Words: 부유식 태양광발전 구조물(Floating PV generation structure), 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced polymeric plastic), 펄트루전 FRP(Pultruded FRP), SMC FRP(Sheet molding compound FRP), 요소기술(Element technique)

1. 서 론

태양광발전은 화석연료를 대체할 차세대 에너지원으로 전세계적으로 각광받고 있고, 세계적으로 관련 산업이 꾸준히 발전하고 있으며, 산업 육성을 위한 관련 제도 또한 마련되고 있다. 이에 국내에서는 2012년부터 태양광발전을 비롯한 여러 신재생에너지 관련 산업을 지원하기 위하여 총 발전량의 일정비율을 신재생에너지로 의무화하는 신재

생에너지 공급의무화 제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)를 도입하였다[1].

이에 국내에서는 내구성이 우수하고, 수변 및 해양 환경에서 내부식성이 뛰어난 섬유강화플라스틱(Fiber reinforced polymeric plastic, FRP)을 이용한 수상 부유식 태양광발전 구조물에 대한 연구가 진행되었다[1-4]. 기존 연구[1-4]에서는 펄트루전 FRP(Pultruded FRP, PFRP)로 제작한 수상 부유식 태양광발전 구조물에 대하여, 구조안전성 및 경제성

Received 20 February 2014, accepted 26 June 2014

* (주)아이시스이엔씨

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

을 확보할 수 있는 구조 형태와 설계 방법을 제안하였다. 이러한 연구 결과들을 통해 현재 수상 부유식 태양광발전 사업은 여러 상용화 발전 단지를 구축하였으며, 그 실효성을 증명하였다.

그러나 수상 부유식 태양광발전 구조물은 대규모로 시공될 경우 구조물간의 연결 방법, 시공의 편의성 등의 문제를 해결해야 하며, 최근 I사에서는 그에 관한 여러 연구를 진행하였다. 본 논문에서는 수상 부유식 태양광발전 구조물의 특징을 설명하고, 대규모 수상 부유식 태양광발전 구조물의 계획, 설계, 시공 과정에서 개발한 다양한 요소기술 등의 개발 배경 및 특성을 제시하였다. 또한, 제시한 요소기술의 구조적 성능을 검토하기 위한 해석적, 실험적 연구를 수행하였다.

2. 수상 부유식 태양광발전 구조물의 특징

수상 부유식 태양광발전 구조물은 단위중량이 작고 내부식성이 뛰어난 FRP (E-glass/polyester, fiber volume ratio of PFRP: 65%)를 적용하여 수상 환경에 요구되는 경량성 및 내구성을 확보하고 있으며, 수상 환경에 적용하기 위한 다양한 요소를 적용하였다. 수상 부유식 태양광발전 단지는 수면의 움직임에 의한 불안정한 지지조건을 극복하기 위해 여러 개의 단위구조물을 연결하여 구성하며, 단위구조물은 크게 태양광모듈, FRP 구조용 부재, 부력체, 연결철물 등으로 구성된다. 단위구조물의 형태 및 구성은 Fig. 1에 나타내었다[5].

단위구조물에 사용된 FRP 부재는 태양광모듈을 결합하기 위한 수직부재 및 태양광모듈 받침부재와 이들을 지지하기 위한 태양광모듈 지지부재, 부력체를 연결하기 위한 부력체 연결부재 및 유지관리 등을 위한 이동통로를 결합하고 부력체 연결부재와 결합하여 구조물의 좌우방향에 대한 강성을 확보하기 위한 발판 연결부재로 구분한다[1,5].

태양광모듈의 배치간격은 태양광모듈의 배치각에 영향을 받으며, 배치각은 수상 부유식 태양광발전 구조물의 설치 위치에 해당하는 위도(Latitude)에 따라 최대 발전효율

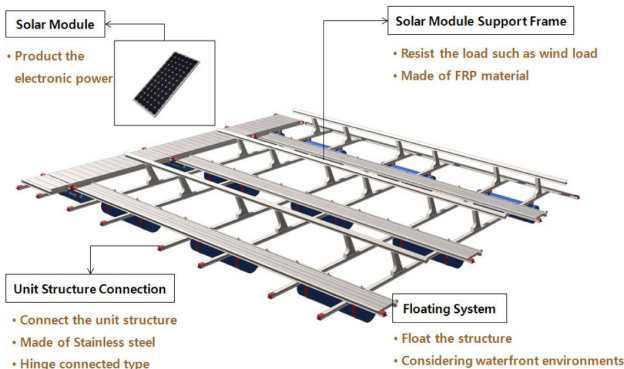


Fig. 1. Composition of floating PV generation system [6]

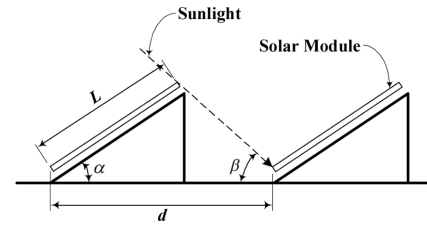


Fig. 2. Separation distance [6,7]

을 고려하여 결정된다. 즉, 태양광모듈의 발전효율은 태양광과 태양광모듈의 배치각이 수직으로 위치할 때 가장 크며, 수상 부유식 태양광발전 구조물의 설치 위치에 해당하는 위도를 고려하여 태양광모듈의 배치각(α)을 결정하여야 한다. 태양광모듈의 배치간격은 전방에 배치되는 태양광모듈이 후방에 배치된 태양광모듈의 발전량에 영향을 미치지 않도록 식 (1)과 같이 결정한다[6].

$$d = \frac{L \sin(180^\circ - \alpha - \beta)}{\sin(\beta)} \quad (1)$$

또한, 식 (1)에 나타난 기호들은 Fig. 2에 나타내었다[5,6].

3. 태양광발전 구조물의 요소기술 개발

이 장에서는 수상 부유식 태양광발전 단위구조물을 구성하는 수직재, 태양광모듈 지지부재, 부력체 연결부 및 단위구조물 연결부에 대한 요소기술들의 경제성 및 시공성 향상을 위한 개선방안을 기존 연구[3-5]에서 제시한 기술과 비교하여 설명하였다.

3.1 단위구조물

단위구조물을 구성하는 부재의 치수는 구조물에 설치되는 태양광모듈의 치수 및 수량에 따라 결정된다. 태양광모듈이 설치되는 횡방향의 부재 치수(11.5 m)는 태양광 모듈의 치수에 의해 결정되며, 길이방향의 구조물 치수(12.6 m)는 태양광모듈의 설치각도(α)에 따라 식 (1)을 통해 구한 이격거리에 의해 결정된다.

본 연구에서 제시한 단위구조물의 형태는 Fig. 3에 나타

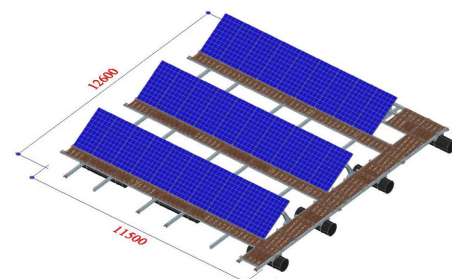


Fig. 3. Suggested unit structure [5]

내었다. 단위구조물은 크기가 작을수록 부재 길이가 감소하며, 이는 단위중량이 작은 FRP의 특성상 대형장비의 사용이 감소하고, 인력에 의한 단순조립공정이 가능해진다. 따라서 단위구조물은 Fig. 3과 같이 횡방향 부재의 최대 치수를 12.6 m(중량: 최대 715 N(73 kgf))로 설계하였다.

FRP 부재의 연결방법은 볼트를 사용한 기계적 연결방법과 접착제를 사용한 연결방법으로 구분하며 수상 부유식 태양광발전 구조물은 기계적 연결방법으로 시공한다. 기계적 연결방법은 연결부의 신뢰성 측면에서 효과적인 것으로 알려져 있으며[3], 부재에 국부적인 손상이 발생할 경우 교체를 통한 보수보강이 용이하다.

3.2 태양광모듈 지지 시스템

수직재는 태양광모듈의 설치 및 각도유지를 위해 도입한 부재이다. 기존 연구[2-4]에서 제시한 수직재는 2개의 PFRP 부재를 연결하여 제작하고, 하나의 수직재를 접합하기 위해 32개의 볼트가 소요되었다. 단순조립공정은 볼트 연결부의 수가 감소할 경우 경제성 및 시공성을 크게 개선할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 SMC(Sheet molding compound) FRP로 제작한 일체화된 단일 수직재를 제안하였다. 기존 연구[3-5]에서 제안한 수직재와 SMC FRP 수직재의 형태는 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4(b)에 나타난 SMC FRP 수직재는 부재수의 감소로 볼트연결부의 수가 8개로 감소하여 시공성을 향상시킬 수 있다. 또한 태양광모듈 연결부재를 임시거치할 요철부를 설치하여 추가적인 시공성 향상을 기대할 수 있다.

기존 연구[3-5]에서 제안한 수상 부유식 태양광발전 구조물은 Fig. 5와 같이 I형 단면 부재에 ㄷ형 단면 부재를 연결한 후 ㄷ형 단면 부재의 플랜지에 태양광모듈을 연결하도록 구성하였다. 이러한 구조 형태는 ㄷ형 단면 부재의 작은 강성으로 인해 풍하중 및 파랑에 의한 작은 변위 및 진동에도 회전변위를 발생시킬 수 있으며, 이에 따른 구조물 또는 태양광모듈의 손상, 발전효율 저하 등의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 태양광모듈의 안정적인 지지와 부재 수 감소를 통한 경제성 확보를 위해 수직재에 위에 설치한 I형 단면 부재에 직접 태양광모듈을 설치할 수 있도록 Fig. 6과 같이 제안하였다. 또한 단면 형태를 자유롭게



(a) Previous model (b) Modified model

Fig. 4. Vertical member [5]



Fig. 5. Previous solar module support frame



(a) SMC FRP member

(b) Solar module support and foothold member

Fig. 6. Suggested solar module support system [3-6]

게 제작할 수 있는 PFRP의 특징을 활용하여, 태양광모듈 지지부재 외에 Fig. 6(b)와 같이 I형 단면 상부 플랜지에 L형 단면을 추가한 태양광모듈 받침부재를 설치하여 태양광모듈을 2점에서 지지하는 방식을 제안하였다.

단위구조물은 태양광모듈을 설치하기 위한 부재 외에도 시공 후 수상에서 태양광모듈 및 부재의 유지관리를 위한 이동로가 필요하다. 따라서 태양광모듈 받침부재는 별도의 I형 단면 부재와 함께 이동로를 설치할 수 있도록 구성하였다.

3.3 부력체 시스템

부력체는 수상 부유식 태양광발전 구조물에 재하되는 하중을 지지하는 역할을 하며 HDPE(High density polyethylene) 원형관의 단부를 용착하여 마감하고, 내부를 우레탄폼으로 충진하는 방법으로 제작한다. 부력체는 인력으로 운반가능한 무게(중량: 약 440.91 N(45 kgf))로 제작하여 시공성이 우수하고, 국부적인 파손이 발생했을 때 보수 또는 교체가 용이하도록 하였다.

초기 부력체 연결은 Fig. 7과 같이 국부적인 응력집중을 방지하기 위한 철물을 부력체 연결부재에 접합하고 철물과 부력체는 스틸밴드를 이용하여 고정하는 방식을 적용하였다. 부력체 연결부는 스틸밴드와 철물 결합, 스틸밴드



Fig. 7. Floating system using steel bend

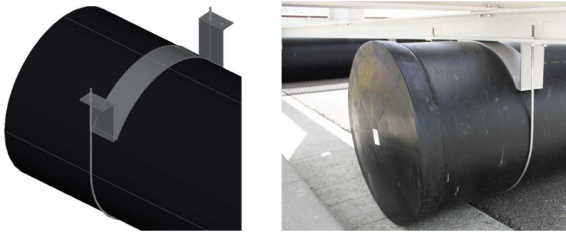


Fig. 8. Floating system using U-bolt

연결, 스틸밴드 절단 및 결속의 과정으로 시공한다. 본 연구에서는 부력체 연결부의 시공과정을 단순화하기 위해 Fig. 8과 같은 부력체 시스템을 제안하였다. 제안한 부력체 시스템은 부재와의 연결볼트 수를 감소시키고, 연결철물과 부력체, 부재를 함께 연결할 수 있는 U-bolt를 제작하여 시공성을 향상시켰다. 또한 부력체 연결철물의 형태를 단순화하여 자재 물량을 감소시켰으며, 스틸밴드의 결속에 필요한 장치들을 U-bolt로 대체하여 경제성을 향상시켰다.

3.4 단위구조물 연결부

수상 부유식 태양광발전 단지는 수면의 불안정한 움직임에 의한 발생응력을 최소화하기 위해 단위구조물을 연결하는 방법으로 구성한다. 기존 단위구조물 연결부는 I형 단면 부재에 연결하기 위한 ㄷ형 연결철물을 용접하여 제작한 후 힌지연결을 위한 원형고리를 용접하여 Fig. 9와 같이 제작하였다. 그러나 이러한 연결부는 잦은 수면의 움직임에 의해 용접부의 피로파괴가 발생할 수 있고, 재료비에 비해 제작비가 크기 때문에 비경제적이다.

본 연구에서는 강재를 절곡하여 Fig. 10과 같이 제작한 연결부를 제안하였다. Fig. 10의 연결부는 기존의 원형고리형태의 연결부를 별도의 전단연결철물로 대체하였다. 또한 연결철물과 전단연결철물은 볼트로 접합하며, 전단연결철



Fig. 9. Previous connection system between unit structures

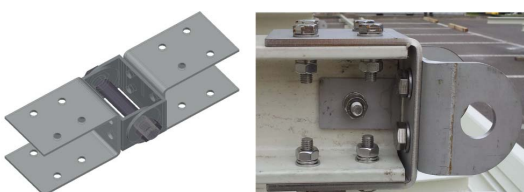


Fig. 10. Modified connection system between unit structures

물은 기존 연결철물보다 직경이 큰 전단볼트를 사용하여 내구성을 개선하였다.

4. 요소기술의 구조적 성능

본 논문에서는 SMC FRP 수직재와 태양광모듈 받침부재를 도입한 단위구조물의 구조적 성능과 부력체의 안전성 여부를 검토하기 위해 유한요소해석을 통한 해석적 연구를 수행하였다. 또한 PFRP 부재와 강재 연결부의 구조적 성능은 실험을 통해 검증하였다. 유한요소해석은 범용유한요소해석 프로그램인 MIDAS Civil 2012를 사용하였다.

4.1 단위구조물의 유한요소해석

기존 연구[1]에서는 SMC FRP 수직재와 태양광모듈 받침부재의 휨성능을 검토하기 위하여 기존 형식과 제안한 형태의 단위구조물에 대한 유한요소해석을 수행하고, 부재 특성에 따라 분류하여 발생한 휨응력을 비교하였다. 기존 연구[1]에서 수행한 유한요소해석 모델은 Fig. 11에 나타내었으며, 유한요소해석에 적용한 재료의 역학적 성질, 작용하중은 Table 1, 2에 각각 정리하였다. 또한, 부재의 특성에 따른 분류는 Fig. 11(b)에 나타내었다[1].

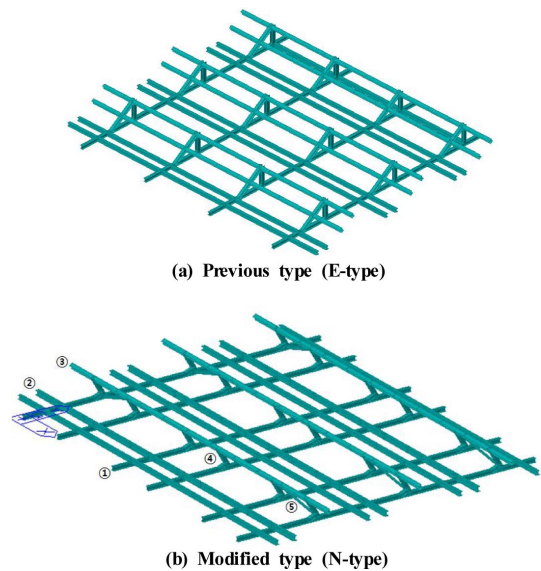


Fig. 11. FE analysis model of floating PV generation system [1]

Table 1. Material properties of FRP [1]

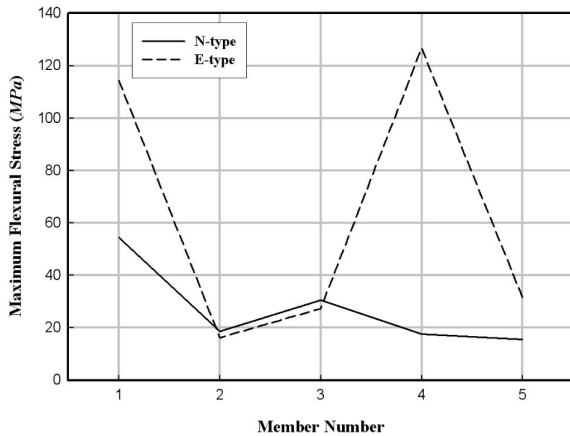
Material		Elastic moduli (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)	Density (gr/cm ³)
PFRP	I-shape	33.28	0.25	402.58	1.88
	L-shape	38.17	0.36	521.53	
SMC FRP		14.33	0.25	80.00	

Table 2. Load composition [1]

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 [1]

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. 12.** Maximum flexural stress [1]

수상 부유식 태양광발전 구조물을 구성하는 PFRP 부재는 제작과정의 특성상 직교이방성(Orthotropic)의 특성을 나타내기 때문에 구조해석을 수행할 때 폭방향의 역학적 성질을 고려하여야 한다. 그러나 최근 ASCE(American Society of Civil Engineers)에서 제안한 잠정설계기준(Prestandard)[7]에서는 좌굴의 영향을 고려하지 않은 휨거동에 대하여 폭방향의 영향을 고려하지 않고 있다. 따라서 기존 연구[1]에서는 길이방향의 역학적 성질만을 고려하여 구조해석을 수행하였다.

해석결과, 개선한 구조물은 기존 구조물에 비해 전체적인 응력상태가 낮게 나타났으며, 하중에 대하여 전부재가 고르게 저항하는 것으로 나타났다. 따라서 개선한 구조물은 경제성 및 하중전달성능을 향상시킨 효율적인 구조물인 것으로 생각된다[1]. Fig. 11(b)에 나타난 부재 구분에 따른 최대휨응력의 분포는 Table 3, Fig. 12에 나타내었다[1].

4.2 부력체의 유한요소해석

부력체의 유한요소해석은 부력에 의한 부력체와 연결철

**Fig. 13.** FE analysis model of floating system**Table 4.** Material properties of floating system

Material	Elastic moduli (GPa)	Poisson's ratio	Tensile strength (MPa)
PE	2.25	0.20	20.40
Urethane form	1.96×10^{-3}	0.05	0.20

Table 5. FE analysis results of floating system

Draft (%)	Maximum stress (MPa)		Deformation (mm)
	PE	Urethane form	
30	0.49	0.59×10^{-3}	0.07
50	0.94	1.08×10^{-3}	0.12
100	1.87	2.16×10^{-3}	0.24

물 사이의 응력집중 발생 여부를 검토하기 위하여 수행하였다. 유한요소해석 모델은 Fig. 13과 같이 솔리드 요소를 적용하였으며, 부력체를 구성하는 PE와 우레탄 폼의 역학적 성질은 Table 4에 나타내었다. 부력체와 연결철물의 경계조건은 단순지지로 가정하였으며, 흘수(draft)가 직경의 30%, 50%, 100%일 경우의 부력에 대하여 수행하였다.

해석결과 부력체는 흘수의 증가에 따라 응력 및 변위가 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 연결철물과의 연결부 위치에서 상대적으로 큰 응력과 변위가 발생하였으나, Table 4의 강도보다 작게 나타났다. 따라서 본 연구에서 제안한 부력체 시스템은 부력에 의한 부력체의 파손이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 유한요소해석 결과는 Table 5에 정리하였다.

4.3 연결부의 강도 평가 실험

본 연구에서는 Fig. 10에 나타난 연결부의 강도를 평가하기 위한 실험을 실시하였다. 실험은 Fig. 14와 같이 베이스 블럭 고정철물에 PFRP 부재를 결합한 후 부재 상부에 연결철물을 조립하여 인발하는 방법으로 수행하였다. 또한 베이스블럭 연결철물은 단위구조물 연결부에 비해 충분히 보강하여 파괴를 방지하였다. 하중은 1,000 kN 용량의 Actuator를 사용하여 1 mm/min의 속도로 재하하였으며, 하중과 변위는 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다.

실험결과, 초기에 연결철물을 구성하는 두 철물은 볼트 연결부를 기준으로 Fig. 15와 같은 변형이 발생하였으며, PFRP 부재와 직접 연결되어 있는 철물의 변형으로 인해 PFRP 부

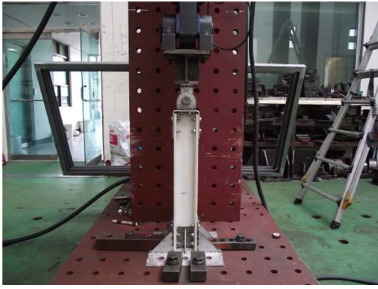


Fig. 14. Testing set-up



Fig. 15. Failure mode

Table 6. Test results of connection system

Edge distance (mm)	Maximum load (kN)	Maximum displacement (mm)	Design load (kN)	Remark
25	151.67	69.25	46.25	OK

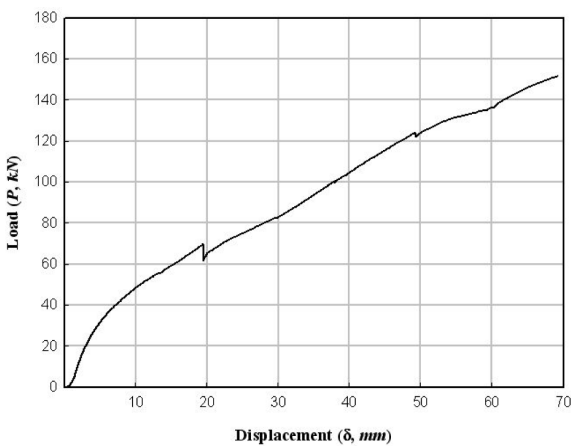


Fig. 16. Load-displacement relationship

재의 면내 압축하중이 발생하였다. 또한 파괴시에는 PFRP 부재의 면내 압축하중으로 인해 부재의 압괴(Crushing)가 발생하였다.

연결부의 파괴하중은 151.67 kN으로 일반적인 설계하중

(46.25 kN)보다 약 3.28배 큰 것으로 나타났다. 또한, 연결철물을 보강하여 볼트파괴(Bolt failure)를 유도할 경우 더 큰 설계하중을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 연결부 실험 조건과 결과는 Table 6에 정리하였으며, 연결부의 하중-변위 관계는 Fig. 16에 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 시공성과 경제성을 개선한 수상 부유식 태양광발전 구조물의 요소기술을 제안하였다. 즉 태양광모듈을 지지하기 위한 수직재를 일체화하고, 태양광모듈 받침 부재를 발판연결부재로 사용하도록 제안하여 시공을 단순화하였고, 경제성, 구조안전성 및 시공성을 확보한 부력체 및 단위구조물 연결 방식을 제안하였다.

향후 FRP를 활용한 수상 부유식 태양광발전 구조물은 부재 단면 감소, 구조물의 치수 조정 및 복합재 기술 발달의 영향 등으로 인해 시공성, 경제성 측면에서 지속적인 발전이 가능할 것으로 판단된다. 또한 수상 부유식 태양광발전 구조물은 신재생에너지분야, 복합소재 분야의 발전에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있는 기술로 발전할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 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.
- Yoon, S.J., *Development of Environment Friendly Floating Type Photovoltaic Generation System for the Effective Land Use*, Technical Report, 2011, Korea Institute of Marine Science & Technology Promotion.
- 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.
- Nam, J.H., *Development of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System Using Pultruded Structural Members*, PhD Thesis, Hongik University, Korea, 2011.
- Yoon, S.J., *Estimation of Structural Behavior for the Floating PV Generation System with High Durability*, Technical Report, Shinhwa E&E, ISIS E&C, 2013.
- Joo, H.J., Lee, N.Y., and Lee, S.W., "Floating Photovoltaic Power Generation System," *The Magazine of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 4, No. 4, 2013, pp. 31-39.
- American Society of Civil Engineers, *Pre-Standard for Load & Resistance Factor Design of Pultruded Fiber Reinforced Polymer Structures*, American Composites Manufacturers Association (ACMA) and ASCE, 2010.