

평지붕 PV거치 시스템의 형태에 따른 풍압영향에 관한 기초연구

A Basic Study on the Effect of the Wind Pressure according to Form on the Flat Roof mounted PV System

윤두영* · 이응직**†

Yun Doo-Young*, Lee Eung-Jik**†

(Submit date : 2013. 9. 13., Judgment date : 2013. 9. 13., Publication decide date : 2013. 10. 22.)

Abstract : The new renewable energy became popular as a clean and sustainable alternative energy under the circumstances that the entire world is facing severe abnormal climate due to the use of fossil fuel, and among which, solar energy can be obtained anywhere and is not difficult to apply it into the existing buildings, which makes it possible to be widely distributed. However, as PV module is installed into a single plate system, it shows structural weaknesses which are vulnerable to wind load and give loss to design elements in external appearance.

Accordingly, this study planned one-step parallel system to complement the problems occurring from a single plate system and used STAR-CCM+ V.8 made by CD-Adapco, a computational fluid dynamics(CFD) simulation tool to measure wind load stability and support based on the design standards for a single plate system and one-step parallel system.

Building height was limited to less than 10m and wind speed was given when increasing from 35m/s to 50m/s by 5m/s on PV system installed into the flat roof. In this case, our analysis suggested that step-one parallel system was in class 7-9 according to Beaufort's wind power classification, which did not have an impact on the fixed PV system, and the single plate system is considered to cause risks in designing wind speed in central districts because it is more than wind power class 12.

Key Words : 단판 시스템(Single Plate System), 1단 병렬 시스템(Step-One Parallel System), 풍하중(Wind Pressure), CFD 시뮬레이션(Computational Fluid Dynamics Simulation)

**† 이응직(교신저자) : 세명대학교 건축공학과
E-mail : drlee@semyung.ac.kr, Tel : 043-649-1422
*윤두영 : 세명대학교 대학원 건설공학과

**† Lee Eung-Jik(corresponding author) : Department of Architectural Engineering, Semyung University.
E-mail : drlee@semyung.ac.kr, Tel : 043-649-1422
*Yun Doo-young : Department of Architectural Engineering, Graduate School, Semyung University.

1. 서 론

1.1 연구의 목적 및 범위

화석 연료의 사용에 따른 지구온난화로 전 세계는 심각한 이상기후 현상에 직면하고 있다. 이에 청정하고 지속가능한 대체에너지로서 신·재생 에너지가 주목 받고 있으며 그 중에서도 태양에너지는 어디에서나 취득이 가능하고 기존 건물에도 적용이 어렵지 않아, 우리나라도 정책적 지원을 통해 태양광 발전시스템 보급이 일반화되고 있다.

이 경우 대부분 건물 옥상부에 거치형태로 설치되며 근래 주택에 설치하는 태양광모듈 용량은 평균 250W이고, 크기는 가로 약 100cm, 세로 약 165cm가 주를 이룬다. 이를 3kW급으로 건물 옥상부에 설치할 경우 어레이 시스템의 크기는 가로 4m, 세로 5m로 20m²의 면적이 형성된다. 이는 장치적으로 경사 지붕에는 경사면과 평행으로 덧붙이기 형태와 평지붕에는 거치형인 단판 시스템으로 설치되는 것이 일반적이다. 그리하여 평지붕에 설치되어있는 단판 PV 시스템은 넓은 면적으로 풍하중과 설하중에 취약한 구조적 불안정성과 외관상으로도 건물에 조화롭게 어울리지 않아 디자인적 만족도가 떨어진다. 실제적으로는 주로 태풍에 의한 피해가 대부분으로 2012년도 한 해에만 상당한 피해 사례가 신·재생에너지센터에 신고 된바있다.¹⁾

따라서 본 논문의 목적은 국내의 일반적인 단판 PV시스템의 이러한 피해를 해소하기 위해 1단 병렬 시스템의 거치형태를 제안하고자 함이며, 그에 따른 1단 병렬거치 PV시스템과 기존의 단판거치 PV시스템 설계기준에 대한 풍하중 영향을 비교·분석하여 그 타당성 도출에 주안점을 둔다.

연구 방법은 전산유체해석(CFD) 시뮬레이션 TOOL인 STAR-CCM+ V.8을 사용하여 설계기

준풍속에서 단판 시스템과 1단 병렬 시스템이 풍하중 상황에서의 내 풍압성에 대해 시험하며 평지붕에 1단 병렬 시스템으로 설치할 경우 면적에 의한 설치한계가 발생할 수 있는 점을 고려하여 3kW급의 1단 병렬 PV시스템 설치가 가능한 충분한 면적의 평지붕으로 가정한다. 거치대와 슬래브의 연결 부위는 실제 시공에 사용되는 지붕바닥과의 볼트 접합 방식으로 설정한다.

2. 이론적 고찰

2.1 지역별 설계 기본 풍속

국내의 경우 지역별로 설계 기본풍속 기준은 Table 1과 같으며, 주변지역의 지표면 상태에 따른 지표면 거칠기(조도)는 Table 2와 같이 A, B, C, D로 구분된다. 본 논문의 실험 조건이 건물높이 10m이하로 한정함에 3.5m 정도의 주택과 같은 건축물이 밀집해있는 B 등급 지역(Table 2)인 내륙지역에서의 풍속인 35%를 설계 기본풍속으로 설정하였다(Table 1).

Table 1 Regional basic wind speed
(source : Korea Energy Management Corporation)

Rating	Division of area	Basic design :wind speed (m/sec)	Various roughness
I Inland area	Seoul, Suwon, Seosan, Daejeon, Chuncheon, Cheonju, Chupungnyeong, Iri, Jeonju, Gwangju, Jinju, Daegu	35	B ²⁾
II Seaside (1)	Incheon, Gunsan, Chungmu, Busan Ulsan	40	.
III Seaside (2)	Sokcho, Gangneung, Pohang, Mokpo, Yeosu, Jeju, Seogwipo	45	.
IV Island	Ulleungdo	50	.

2) where it's set as A in Table 2 in the center of high rise urban areas

1) www.etnews.com, 03. September 2012.

Table 2 Terrain category (source : KBC 2009)

Ground surface roughness	Ground surface state in the region around
A	where high buildings (tenth floor or more) are dense in the central city,
B	where buildings such as houses sized in 3.5m are dense (where medium-sized buildings are scattered)
C	where obstacles about 1.5~10m high are dense (where low-rise buildings are scattered)
D	where there are little obstacles and the average height of the surrounding obstacles is less than 1.5m (coast, grassland, airfield)

2.2 시뮬레이션 프로그램

PV시스템 지지가능 여부의 해석에는 일반적으로 상용되는 전산 유체해석(CFD) 시뮬레이션 프로그램은 CD-adpco사의 STAR-CCM+ V.8을 사용하였다. 이 프로그램은 CAD에서부터 후처리까지 Single Intergrated 소프트웨어 환경에서 통합적 CFD과정을 제공하며, CAD나 격자를 자동적으로 만들 수 있도록 함으로써 좀 더 빠르고 정확한 결과를 제공한다. 또한 건축 분야에서는 건축관련 엔지니어와 건축가들에게 난방, 환기 및 Air Conditioning(HVAC)의 보다 정확하고 자세한 결과를 제공할 수 있으며, 클린룸 및 건축의 설계, 공기 오염 물질의 이동, 건물이나 터널 내 화재 분석 등에도 사용하고 있다. 그리고 건축물 주위 환경에 의한 공기역학적인 해석은 바람으로 인해 건물과 같은 시스템에 생기는 하중 및 압력의 예측과 실내외 공간에서의 쾌적성과 안전성의 최적화에 활용이 가능하다.

3. PV 거치시스템 시뮬레이션

3.1 풍압 시뮬레이션

시뮬레이션을 위한 설치 조건은 가장 바람직한 정남향, 설치각도 수평면에 30도로 설치

하고 중부지방 설계기준풍속 35m/s를 기준으로 5m/s증가시켜 최대 50m/s까지 검토하였으며, 바람의 방향은 거치대의 전면 및 후면 중 풍압이 더 크게 작용할 후면을 대상으로 하였다.

풍압 산출을 위한 CFD 모델은 3차원 풀스케일 정상상태로 진행하였고 CFD 해석 알고리즘은 SIMPLE(Semi-Implicit Method for Prssure-Linked Equations) 해법을 적용하여 난류모델은 K-Epsilon Turbulence Model로 벽함수는 Standard wall function을 사용하였다.

건물은 가로, 세로, 높이 각각 10m, 11m, 11m의 직육면체 형태로 전체 해석영역의 너비, 깊이, 높이는 Fig. 1의 상황이다

제반 시뮬레이션 조건을 정리하면 다음과 같다.

- ① 향 : 정남향(평지붕 면과 30° 경사)
- ② 높이 : 건물10m 이하 평지붕(단독주택)
- ③ 풍속 : 중부지방 설계기준풍속(35m/s)를 기준으로 5m/s씩 증가시켜 최대 50m/s까지 검토
- ④ 풍향 : PV 전면 및 후면(남풍 및 북풍) 중 불리한 조건인 후면을 선정

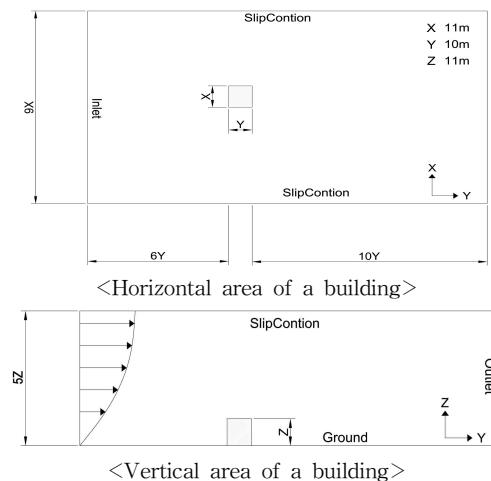
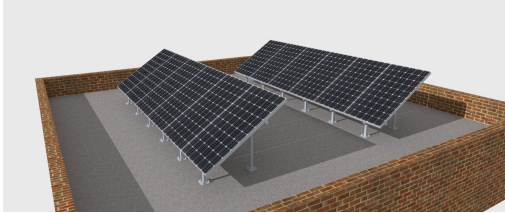


Fig. 1 Analysis area and the boundary conditions

3.2 PV거치대 형태

(1) 1단 병렬 시스템

Table 3 Summary of Step-one Parallel System

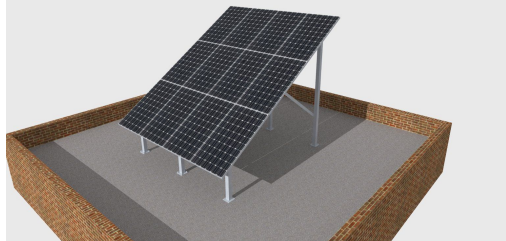


Type	Step-one parallel system
Arrangement	-250W Six of photovoltaic modules 2-line installation
Material and thickness	-Material : galvanized square pipe(50×50 / thickness 3.2mm / unit weight 4.5kg/m)

1단 병렬 거치시스템은 PV모듈을 1단으로 병렬 배열한 형태로 단판 거치시스템에 비해 높이가 낮아 풍하중에 영향을 적게 받는 구조이다. 거치대와 옥상면의 연결은 기둥연결 플레이트 판의 네 부분에 지정 앵커볼트로 고정한다.

(2) 단판 시스템

Table 4 Summary of Single Plate System



Type	Single plate system
Arrangement	-250W four photovoltaic modules 3 stage
Material and thickness	-Material : galvanized square pipe(100×100 / thickness 4.5mm / unit weight 13.1kg/m)

단판 시스템은 국내 단독주택에서 일반적으로 설치하는 형태로 PV모듈이 연결되어 하나의 넓은 판을 형성하는 것이 특징이다. 거치대와 옥상면의 연결은 1단 병렬 시스템과 동일한 방법으로 고정한다.

3.3 시뮬레이션 결과 분석

각 시스템에 35%, 40%, 45%, 50%의 풍속을 작용시켜 시뮬레이션을 진행하여 그 결과 분석을 통해 PV시스템에 작용하는 풍속 및 압력을 알아보았다.

(1) 1단 병렬 시스템

35%부터 50%까지 건물과 태양광모듈에 작용하는 각각의 풍속과 풍압은 Table 6에서 확인되는 것처럼 외부 풍속이 5%씩 증가됨에 따라 태양광모듈에 작용하는 최대 풍속은 15.93%, 18.06%, 20.1%, 22.13%로 각각 약 2%씩 풍속이 증가됨을 확인할 수 있으며, 평균 풍속은 그보다 작은 4.59%, 5.21%, 5.83%, 6.45%로 각 0.62%씩 일정하게 증가되는 것을 확인할 수 있다.

풍속에 따라 태양광모듈에 작용하는 최대압력은 -258.17Pa, -334.98Pa, -420.54Pa, -514.38Pa로 평균 85Pa씩 낮아지고 있으며, 이는 외부에서 작용하는 풍속이 빠를수록 변화하는 압력의 수치는 높아지는 것이다.

(2) 단판 시스템

35%부터 50%까지 5%씩 증가됨에 따라 태양광모듈에 작용하는 최대 풍속이 51.85%, 59.2%, 66.65%, 74.03%로 각각 약 7.4%씩 풍속이 증가됨을 확인할 수 있으며, 평균 풍속은 그보다 작은 16.1%, 18.4%, 20.7%, 23.0%으로 각 2.3%씩 동일하게 증가되는 것을 확인할 수 있다.

Table 5 Step-one Parallel System PV velocity and pressure of wind CFD analysis

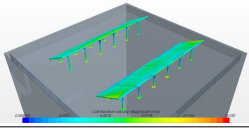
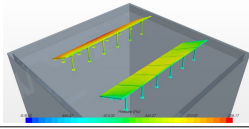
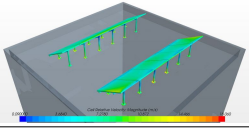
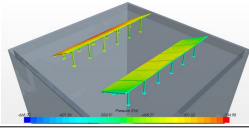
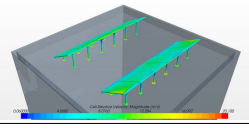
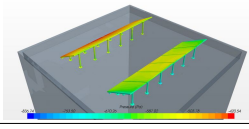
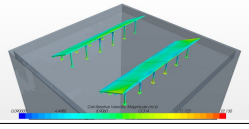
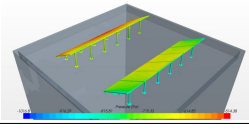
35 ^{m/s} Simulation analysis		40 ^{m/s} Simulation analysis	
			
Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel	Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel
45 ^{m/s} Simulation analysis		50 ^{m/s} Simulation analysis	
			
Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel	Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel

Table 6 Step-one Parallel System PV velocity and pressure of wind distribution

		35 ^{m/s}	40 ^{m/s}	45 ^{m/s}	50 ^{m/s}	
Wind (m/s)	Building cross section (uppermost)		30.4	33.2	38	41.1
	PV panel	Maximum	15.93	18.06	20.1	22.13
		Average	4.59	5.21	5.83	6.45
		Minimum	0.05	0.09	0.06	0.09
Pressure (Pa)	Building cross section	Positive pressure	696.18	909.3	1150.8	1421
		Negative pressure	-454.4	-586.64	-734.96	-895.88
	PV panel	Maximum	-258.17	-334.98	-420.54	-514.38
		Average	-364.38	-470.46	-589.8	-720.6
		Minimum	-518.42	-668.2	-836.74	-1016.8

풍속에 따른 태양광모듈 작용 최대압력은 930.64Pa, 1251.5Pa, 1582.3Pa, 1953.1Pa로 평균 340.82Pa씩 높아지고 있으며, 역시 풍속이 빠를수록 변화하는 압력의 수치는 높아지고 있다. 이 경우에는 Table 8의 데이터가 보여주는 바와 같이 외부에서 빠른 풍속이 작용할수록 태양광모듈에 작용하는 최대압력이 높아지지만 최소, 평균압력은 낮아지는 특징이 나타나고 있다.

3.4 소결

1단 병렬 시스템과 단판 시스템의 후면부

에 설계기준풍속인 35^{m/s}부터 최대 50^{m/s}까지 5^{m/s}씩 풍속이 증가될 때 1단 병렬 시스템의 태양광모듈에 작용하는 최대, 최소, 평균압력은 전체적으로 부압(-)이 걸리는 반면, 단판 시스템의 태양광모듈에 작용하는 최대압력은 점점 높아지는 정압(+)이, 최소 및 평균압력은 점점 낮아지는 부압(-)이 나타난다. 이를 통하여 두 거치시스템 중 단판으로 구성된 PV시설 작용풍압의 강도가 훨씬 크고 태양광모듈의 압력이 불균형한 상태가 되어 압력차 현상에 의한 PV 거치시스템 분리·파손의 위험성이 클 것으로 판단된다.

Table 7 Single Plate System PV velocity and pressure of wind CFD analysis

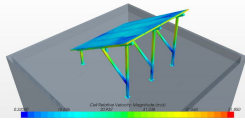
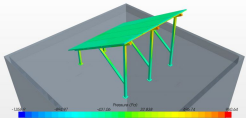
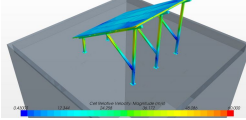
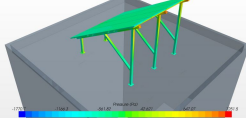
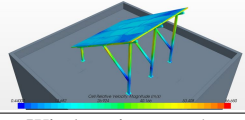
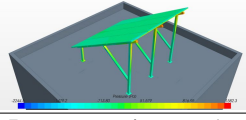
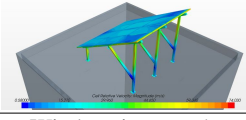
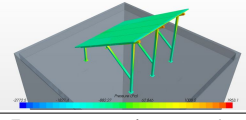
35 ^{m/s} Simulation analysis		40 ^{m/s} Simulation analysis	
			
Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel	Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel
45 ^{m/s} Simulation analysis		50 ^{m/s} Simulation analysis	
			
Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel	Wind acting on the PV panel	Pressure acting on the PV panel

Table 8 Single Plate System PV velocity and pressure of wind distribution

			35 ^{m/s}	40 ^{m/s}	45 ^{m/s}	50 ^{m/s}
Wind (^{m/s})	Building cross section (uppermost)		28.1	30.25	34.8	38.7
	PV panel	Maximum	51.85	59.2	66.65	74.03
		Average	16.1	18.4	20.7	23
		Minimum	0.32	0.42	0.44	0.58
Pressure (Pa)	Building cross section	Positive pressure	808.56	1054.7	1331.6	1644.8
		Negative pressure	-933.38	-1216.8	-1536.5	-1891
	PV panel	Maximum	930.64	1251.5	1582.3	1953.1
		Average	-279.02	-363.85	-460.1	-564.4
		Minimum	-1358.9	-1770.7	-2244.5	-2772.5

또한 두 시스템의 태양광모듈에 작용하는 풍속의 차이는 Table 9에서 확인되는 바와 같이 외부 풍속이 35^{m/s}일 때 35.92^{m/s}, 40^{m/s}일 때 41.14^{m/s}, 45^{m/s}일 때 46.55^{m/s}, 50^{m/s}일 때 51.9^{m/s}로 나타나 외부 풍속이 높을수록 그 차이는 점점 더 커짐을 알 수 있다.

한편 풍환경에 관한 기준으로 주로 사용하는 Beaufort 지수를 통하여 PV시스템에 작용하는 풍환경을 평가하면, Table 10 과 같이 Beaufort 풍력계급은 1에서 12단계까지 등급이 나누어져 풍속이 강할수록 계급번호가 높아진다.

Table 10 Beaufort wind scale

Beaufort factor	Wind speed(^{m/s})	Title
0.1 ~ 6	0 ~ 13.8	calm ~ Strong breeze
7	13.9 ~ 17.1	Moderate gale
8	17.2 ~ 20.7	Fresh gale
9	20.8 ~ 24.4	Strong gale
10	24.5 ~ 28.4	Whole gale
11	28.5 ~ 32.6	Storm
12	32.7 ~	Typhoon

(source : Lim, M.-T., Building Environmental Planning, Bo-mun Dang, 2007)

본 논문의 시험조건의 태양광모듈에 미치는

Table 9 Step-one Parallel System, Single Plate System
PV velocity and pressure of wind distribution

			Step-one Parallel Sys.	Single Plate Sys.	
35 ^{m/s}	Wind (^{m/s})	Building cross section (uppermost)		30.4	28.1
		PV panel	Maximum	15.93	51.85
			Average	4.59	16.1
		Minimum	0.05	0.32	
	Pressure (Pa)	Section	Positive pressure	696.18	808.56
			Negative pressure	-454.4	-933.36
		PV panel	Maximum	-258.17	930.64
			Average	-364.38	-279.02
				Minimum	-518.42
40 ^{m/s}	Wind (^{m/s})	Building cross section (uppermost)		33.2	30.25
		PV panel	Maximum	18.06	59.2
			Average	5.21	18.4
		Minimum	0.09	0.42	
	Pressure (Pa)	Section	Positive pressure	909.3	1054.7
			Negative pressure	-586.64	-1216.8
		PV panel	Maximum	-334.98	1251.5
			Average	-470.46	-363.85
				Minimum	-668.2
45 ^{m/s}	Wind (^{m/s})	Building cross section (uppermost)		38	34.8
		PV panel	Maximum	20.1	66.65
			Average	5.82	20.7
		Minimum	0.06	0.44	
	Pressure (Pa)	Section	Positive pressure	1150.8	1331.6
			Negative pressure	-734.96	-1536.5
		PV panel	Maximum	-420.54	1582.3
			Average	-589.8	-460.1
				Minimum	-836.74
50 ^{m/s}	Wind (^{m/s})	Building cross section (uppermost)		41.1	38.7
		PV panel	Maximum	22.13	74.03
			Average	6.45	23
		Minimum	0.09	0.58	
	Pressure (Pa)	Section	Positive pressure	1421	1644.8
			Negative pressure	-895.88	-1891
		PV panel	Maximum	-514.38	1953.1
			Average	-720.6	-564.4
				Minimum	-1016.8

최대풍속이 1단 병렬 시스템의 경우 15.93~22.13^{m/s}으로 Beaufort 풍력계급 지표에 따라 7등급부터 9등급에 해당하여 고정되어있는 PV 거치시스템에 큰 영향이 작용될 정도는 아니다. 하지만 단판 시스템의 경우 51.85~74.03

^{m/s}으로 12등급 이상에 해당하는 풍력등급으로 중부지방 설계풍속에서 위험을 초래할 수 있을 것이며, 정확한 구조계산과 그에 따른 지지대의 보강 등 대책이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 건물용 PV시스템의 바람직한 거치시스템 제안을 위해 CFD 해석 프로그램을 통하여 PV시스템 형태에 따른 풍하중 영향을 비교·분석하였다. 내용의 초점은 설계기준풍속에서 1단 병렬 시스템과 단판 시스템의 풍하중 영향정도에 대한 사항으로서 연구의 결과는 다음과 같이 도출되었다.

- (1) Beaufort 풍력계급을 이용한 두 시스템의 풍환경 평가는 1단 병렬 시스템 작용강도가 7~9등급으로 일반적 강풍에 해당하고, 단판 시스템의 경우 12등급 이상의 가옥에 큰 손해가 일어날 수 있는 위험수준에 해당한다.
- (2) 풍압의 경우, 동일조건 아래에서 1단 병렬 시스템이 단판 시스템에 비해 작용하는 압력의 강도가 약하고 그 변화의 폭도 크지 않기 때문에 구조적 안정성에 있어 유리하다.
- (3) 1단 병렬 시스템 후면은 전체적으로 부압(-)이 작용하며 풍압 및 풍속이 일정하게 증가하거나 감소되는 반면에 단판 시스템은 정압(+)과 부압(-)이 동시에 작용하는 불안정한 형상을 보이므로 더 높은 풍속과 압력이 작용한다.
- (4) 따라서 1단 병렬 시스템보다 단판 시스템이 풍하중에 더욱 취약하다는 것을 확인할 수 있고, 1단 병렬 시스템에 의한 PV설치는 풍하중 피해를 줄이고 구조적 강도를 완화한 부재사용이 가능하므로 전체 시스템 설치비용 저감에도 영향이 있을 것이라 판단된다.
- (5) 본 연구를 기반으로 하여 복잡하게 작용하는 다양한 방향에서의 풍속과 풍압에 대한 변화상황을 분석하여 시스템의 파괴

와 지지 한계성을 구체화하는 작업이 향후 연구의 방향으로 사료된다.

후 기

본 논문은 2012년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

1. Kim, W.B., Finite Element Structural Analysis Tracker Subjected to Wind Loading and Assessment, Master Dissertation, Sunchon National University, 2012.2
2. Park, G.T., A Study on Structural Safety as per Installation Height of a Solar Tracker, Master Dissertation, Kyungpook National University, 2012.2
3. Prasad D., Snow M., Solar Power-A Source Book for Building Integrated Photovoltaics, Images Publishing, 2005
4. Mukund R. Patel, Wind and Solar Power Systems: Design, Analysis, and Operation, Taylor & Francis, 2006