

수상 태양광발전 시스템의 풍력계수 산정에 관한 실험적 연구

이영근*, 이남형, 주형중, 윤순종**

An Experimental Study on the Estimation of Wind Force Coefficient of Floating Type Photovoltaic Energy Generation System

Young-Geun Lee*, Nam-Hyung Lee, Hyung-Joong Joo and Soon-Jong Yoon**

Abstract

In recent years, green house effect related natural disasters occur throughout the world. Carbon dioxide, mainly comes from the fossil fuel burning, is suspected to be the cause of green house effect. To reduce the emission of carbon dioxide, we need to find alternative energy resources such as photovoltaic energy. In this paper, the basic characteristics of wind force coefficient on a PV panel installed on the floating type PV energy generation system are investigated through the two-dimensional wind tunnel tests. Test variables included the angle of PV panel, direction of wind, number of rows of PV panel and attached or not attached frame. Based on the results obtained through the wind tunnel tests, it was found that the wind force coefficient can be used as a preliminary data in the design of the structure.

Key words

Wind force(풍하중), Wind force coefficient(풍력계수), Floating type PV energy generation system(수상 태양광발전 시스템)

(접수일 2013. 2. 1, 수정일 2013. 3. 15, 게재확정일 2013. 3. 15)

- * 홍익대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Hongik University)
■ E-mail : esdras1981@gmail.com ■ Tel : (02)3141-0774 ■ Fax : (02)3141-0774
- ** 홍익대학교 토목공학과 (Department of Civil Engineering, Hongik University)
■ E-mail : sjyoon@hongik.ac.kr ■ Tel : (02)320-1479 ■ Fax : (02)3141-0774

Nomenclature

L : length, m
 F : force, N
 V : wind speed, m/s
 C : aerostatic coefficient
 θ : angle of panel

Subscript

M : model
 P : practice
 d : drag force
 l : lift force
 m : moment

1. 서론

기후변화를 유발하는 온실가스(Green House Gas, GHG) 배출은 계속해서 증가하고 있으며, 이로 인한 영향은 이미 전 세계 인류의 삶에 직접적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 에서 발간한 보고서⁽¹⁾에 따르면, 기후변화에 대한 대처방법 중 신재생에너지를 활용하는 것은 가장 많은 이점을 지니고 있으며, 신재생에너지 이용량은 계속 증가되는 것이 바람직하다고 판단하고 있다. 국내에서도 태양광발전과 풍력발전, 바이오매스발전 등의 다양한 신재생에너지 발전 시설이 건설되고 있으며, 그 양은 점차 증가하고 있다. 이러한 신재생 에너지의 발전 속에 국내의 좁은 국토 사정과 각종 민원의 문제로 인하여 수면을 이용한 신재생 에너지가 대두되고 있다⁽²⁾. 그 대표적인 예로는 해상 풍력과 수상 태양광발전이 계획 및 건설되고 있으며, 해양 혹은 공유수면을 이용한 태양광발전 시스템에 대한 실증이 이루어지고 있다. 특히 최근 부유식 태양광발전 시스템의 개발로 공유수면을 활용하는 사례가 증가되고 있다.

수상 태양광발전 시스템은 태양광패널, 지지프레임, 부유체로 구성되며, 수상 태양광발전 시스템은 면적 대비 경량구조이며 외부에 노출되어 있기 때문에 태풍 등에 의한 피해가 발생하기 쉬우며 특히 메가와트급의 대규모 태양광발전 시스템 설치 시에는 풍하중에 대한 안전성 검토가 필수적이다⁽²⁾. 일본의 경우 Shiraiishi 등⁽³⁾은 태양광패널의 정적공기력 특성 규명을 위해 풍동실험을 수행하였으며, Matsumoto 등⁽⁴⁾은 태양광패널의 정적공기압 분포를 현장 계측하여 풍동실험 결과와 비교 검토하는 연구를 수행한 바 있다.

이 논문은 수상 태양광발전 시스템의 설계에 적용되는 하중 중, 가장 큰 영향을 미치는 풍하중의 산정 방법에 관한 연구의 일부로서, 부유식 태양광패널과 프레임에 대상 구조물로 하여 풍동실험을 실시하였다. 풍동실험을 통하여 발전모듈에 작용하는 정적풍하중 계수를 구하였으며, 경사각도, 바람방향, 배치방법, 프레임 부착여부를 실험 변수로 설정하여 변수에 따른 영향을 검토하였다.

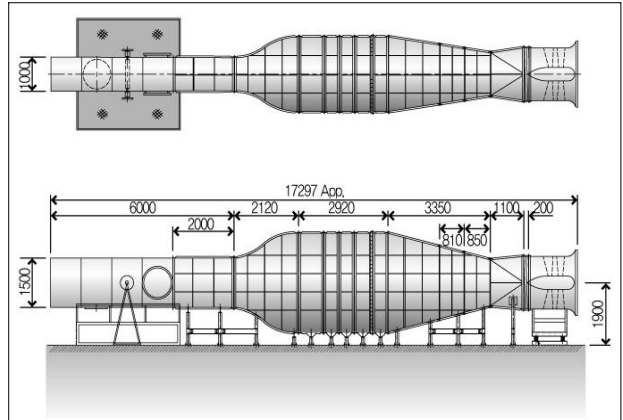


Fig. 1 Two-dimensional wind tunnel system



Picture 1 View of the two-dimensional wind tunnel system

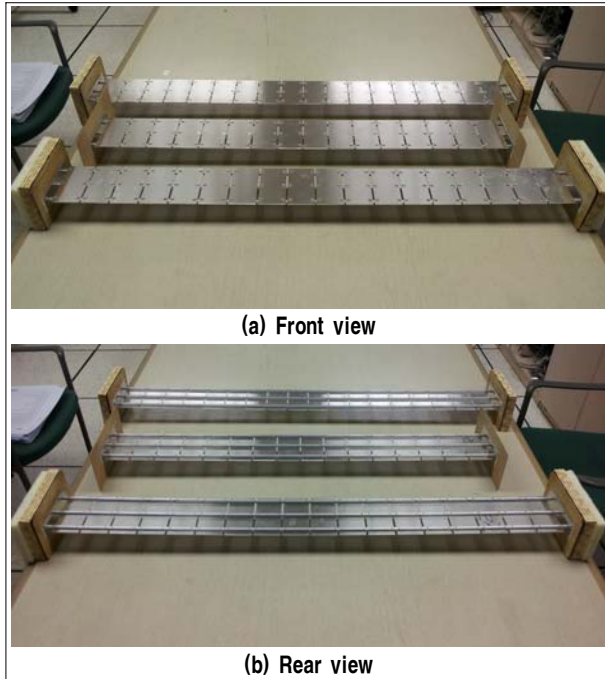
2. 풍동실험

2.1 풍동 제원

풍동실험은 현대건설(주) 연구개발본부의 2차원 소형풍동에서 수행하였다. 풍동의 재원은 Fig. 1에 나타내었으며, 풍동 특정부의 크기는 1.0m(폭)×1.5m(높이)×6.0m(길이)이며, 풍속은 0.3m/s ~ 20.0m/s이다. Picture 1에 풍동 실험실 전경을 나타내었다.

2.2 모형 제작

풍동실험은 수상 태양광발전 시스템에서 풍하중이 작용하는 면적 중 대부분을 차지하는 태양광패널을 대상으로 수행



Picture 2 Model of PV Panel

하였고, 추가적으로 프레임의 부착 유무에 따른 영향을 검토하기 위하여 태양광패널과 프레임의 모형을 제작하였다. 모형의 크기는 풍동 측정부 면적을 고려하여 상사율을 1/20으로 설정하였으며, 태양광패널의 강체 축소모형을 각각 3기씩 제작하였다. 제작된 모형을 Picture 2에 나타내었다. 모형제작 및 실험에 사용된 기하학적 상사율은 식 (1)에 나타내었다.

$$\text{Length } (L, m): \frac{L_M}{L_P} = \frac{1}{20} \quad (1)$$

Where, L_M : Length of model
 L_P : Length of practice

2.3 변수 설정

풍동실험의 변수는 경사각도, 바람방향, 배치방법, 프레임의 부착여부로 4가지로 설정하였다. 경사각도의 경우 국내에서 일반적으로 사용되는 태양광패널의 각도인 30°를 기준으로 20°, 30°, 40°로 설정하였고, 바람의 방향은 순풍과 역풍으로 구분하여 적용하였다. 배치방법은 각 풍하중에 의한 각

Table 1 Case of experiment

Case	Angle (θ , °)	Direction of wind	Number of row	Attached Frame		
20-1-F-N	20	Fair wind	1	-		
20-3-F-N			3	-		
20-1-T-N		Tail wind	1	-		
20-3-T-N			3	-		
30-1-F-N	30	Fair wind	1	-		
30-1-F-A			1	○		
30-3-F-N			3	-		
30-3-F-A			3	○		
30-1-T-N		Tail wind	1	-		
30-1-T-A			1	○		
30-3-T-N			3	-		
30-3-T-A			3	○		
40-1-F-N			40	Fair wind	1	-
40-3-F-N					3	-
40-1-T-N	Tail wind	1		-		
40-3-T-N		3		-		

<Designation of case>

Angle - No. of row - Direction of wind - Attached Frame
 F(Fair)/T(Tail) A(Attached)/N(Not Attached)

행의 영향을 조사할 수 있도록 단독배치(1행)와 병렬배치(3행)로 설정하였다. 마지막으로 경사각도 30°의 실험에 대하여 프레임 부착과 프레임 미부착으로 나누어 실험을 수행하여 프레임의 영향을 조사하였다. 각각의 변수를 종합하여 실험케이스를 Table 1에 나타내었다. 또한 Fig. 2에 측정 개념도를 나타내었다.

2.4 풍동실험

각 Case에 따른 실험을 수행하였으며, 모형 양단부에 Load cell을 설치하고, 이를 풍동 외부의 지지장치에 고정하였다. 또한, Load cell과 모형은 회전이 가능한 단봉으로 연결하여 양각 변화에 따른 공기력의 변화를 풍축에 대해 측정할 수 있도록 하였다. 이 실험에 사용된 Load cell은 항력, 양력, 모멘트를 동시에 측정할 수 있는 것으로 50N 용량이다. 실험에 사용된 풍속은 건축구조설계기준⁽⁵⁾에서 국내기준상 최대 설계풍속인 45m/s를 식 (2)에서 제시한 상사율을 이용하여 풍동풍속을 결정하였으며⁽⁶⁾, 풍동풍속은 10m/s로

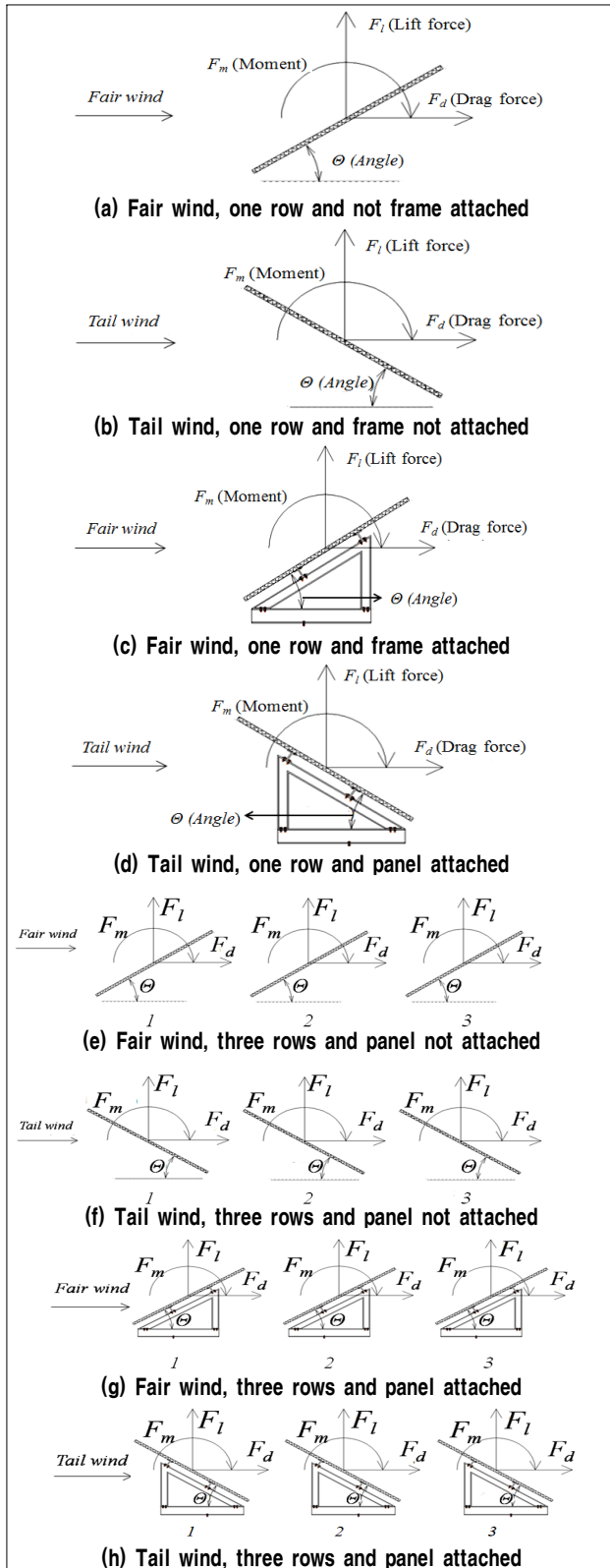
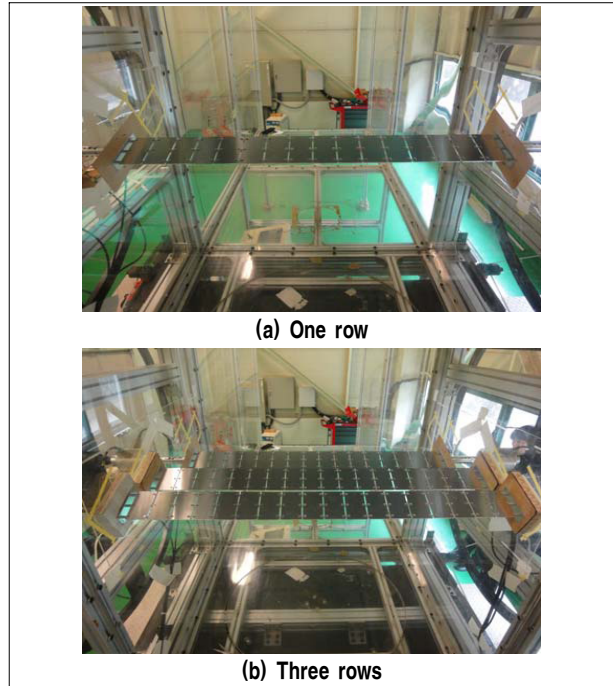


Fig. 2 Experimental Scheme



Picture 3 Test set-up⁽⁶⁾

결정하였다. 풍동실험을 위한 모형 셋팅 전경을 Picture 3에 나타내었다.

$$\text{Wind speed } (V, \text{ m/s}): \frac{V_M}{V_P} = \frac{1}{\sqrt{20}} \quad (2)$$

Where, V_M : Wind speed of model
 V_P : Wind speed of practice

3. 풍동실험 결과 분석

3.1 풍동실험 결과

수행된 풍동실험의 Load cell에서 얻어진 값을 모형의 단위길이(m)당 공기력으로 환산하여 항력계수(C_d , 식 (3)), 양력계수(C_l , 식 (4)), 모멘트계수(C_m , 식 (5))를 구하였다⁽⁶⁾⁽⁷⁾. 최종적으로 항력 및 양력의 합력을 태양광발전 구조물에 작용되는 풍력으로 정의하여 풍력계수(C_w)를 구하였다. 이렇게 구한 결과를 Table 2와 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 2 Result of the experiment on one row case

Case	Wind force coefficient	Drag coefficient	Lift coefficient	Moment coefficient
20-1-F-N	0.795	0.337	-0.720	-0.108
20-1-T-N	0.906	0.371	0.826	0.106
30-1-F-N	0.925	0.532	-0.756	-0.100
30-1-F-A	0.935	0.536	-0.766	-0.095
30-1-T-N	1.042	0.579	0.866	0.090
30-1-T-A	1.165	0.593	1.003	0.073
40-1-F-N	1.052	0.728	-0.760	-0.087
40-1-T-N	1.178	0.798	0.867	0.090

Table 3 Result of the experiment on three rows case

Case	row	Wind force coefficient	Drag coefficient	Lift coefficient	Moment coefficient
20-3-F-N	1	0.700	0.256	-0.652	-0.105
	2	0.169	0.059	-0.158	0.014
	3	0.328	0.125	-0.303	-0.033
20-3-T-N	1	0.789	0.349	0.707	0.090
	2	0.344	0.122	-0.321	0.006
	3	0.421	0.257	0.334	0.031
30-3-F-N	1	0.847	0.440	-0.724	-0.086
	2	0.150	-0.082	0.126	0.011
	3	0.379	0.198	-0.323	-0.009
30-3-F-A	1	0.847	0.450	-0.718	-0.089
	2	0.181	-0.097	0.153	0.008
	3	0.319	0.187	-0.259	-0.008
30-3-T-N	1	0.973	0.522	0.821	0.070
	2	0.306	-0.167	-0.257	-0.005
	3	0.488	0.368	0.320	0.008
30-3-T-A	1	1.104	0.586	0.935	0.067
	2	0.440	-0.278	-0.341	-0.017
	3	0.519	0.357	0.377	0.005
40-3-F-N	1	0.977	0.671	-0.710	-0.089
	2	0.197	-0.123	0.155	0.023
	3	0.497	0.326	-0.376	-0.005
40-3-T-N	1	1.127	0.755	0.837	0.093
	2	0.247	-0.165	-0.184	-0.024
	3	0.620	0.389	0.483	0.014

$$C_d = \frac{F_d}{1/2\rho V^2 D} \quad (3)$$

$$C_l = \frac{F_l}{1/2\rho V^2 D} \quad (4)$$

$$C_m = \frac{F_m}{1/2\rho V^2 D^2} \quad (5)$$

Where, D : reference length of model($D=1,960m$)

3.2 실험결과 분석

3.2.1 경사각도에 따른 영향

실험결과에서 태양광패널의 경사각도의 영향을 분석하였으며, 그 결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 알 수 있듯이, 단독배치의 경우에는 순풍과 역풍 모두에서 경사각도가 증가함에 따라 항력계수가 증가되며, 양력계수는 역풍과 순풍에 따라 양력의 방향은 변경되지만 절대값이 거의 동일함을 알 수 있었다. 항력계수와 양력계수의 합력으로 계산되는 풍력계수는 항력계수의 증가로 인하여 경사각도가 증가됨에 따라 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

Fig. 4를 보면, 병렬배치의 경우에는 각 행에 따라 경사각도의 영향이 다른 것을 알 수 있다. 우선 가장 큰 영향을 받는 1행의 경우에는 단독배치와 마찬가지로 순풍과 역풍 모두에서 경사각도가 증가함에 따라 항력계수가 증가되며, 양력계수는 역풍과 순풍에 따라 양력의 방향은 변경되지만 절대값은 경사각도와 상관없이 유사하다. 따라서 풍력계수는 항력계수의 증가로 인하여 경사각도가 증가됨에 따라 선형적으로 증가되는 것을 알 수 있다.

2행에서 순풍의 경우, 경사각도의 증가함에 따라 풍력계수의 변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 경사각도에 따라 항력계수와 양력계수의 절대값은 큰 변화가 없으며 항력과 양력의 방향이 변경되는 것을 알 수 있다. 2행의 역풍의 경우, 경사각도가 증가함에 따라 풍력계수가 감소하는 것을 확인하였으며, 이것은 항력계수의 감소가 원인인 것으로 판단된다.

3행에서 순풍의 경우, 1행과 마찬가지로 경사각도가 증가함에 따라 풍력계수가 선형적으로 증가되었으며 이것은 항력계수의 증가가 원인인 것으로 판단된다.

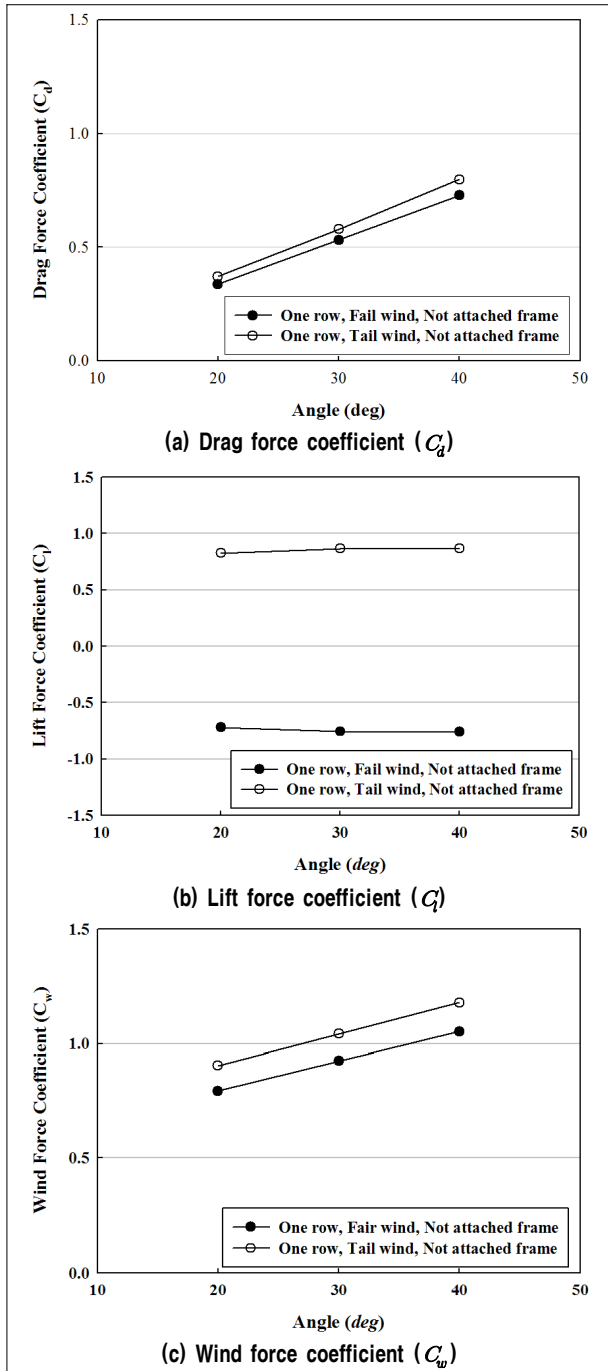


Fig. 3 Effect of the angle in one row case

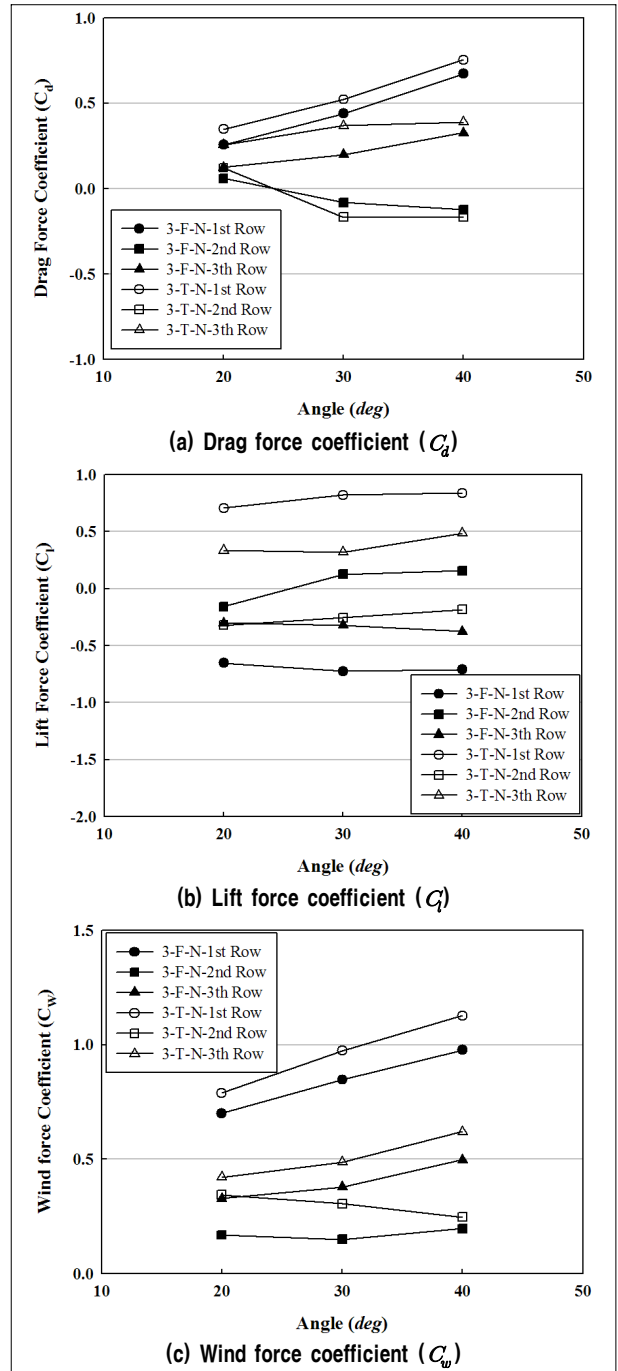


Fig. 4 Effect of the angle in three rows case

3.2.2 배치방법에 따른 영향

실험결과에서 단독배치의 경우와 병렬배치의 각 행의 풍력 계수를 비교하여 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 단독배치의 경우가 가장 크게 나타났으며, 병렬배치 1행, 3행, 2행의 순

서로 감소되는 것을 알 수 있었다. 단독배치의 경우는 1개의 행이 공기력을 모두 받게 되어 큰 값을 보이게 된다. 병렬배치에서는 총 3행의 구조물 중에서 1행이 전체 공기력의 약 59.5%, 2행이 약 12.3%, 3행이 28.2%의 공기력을 부담하게

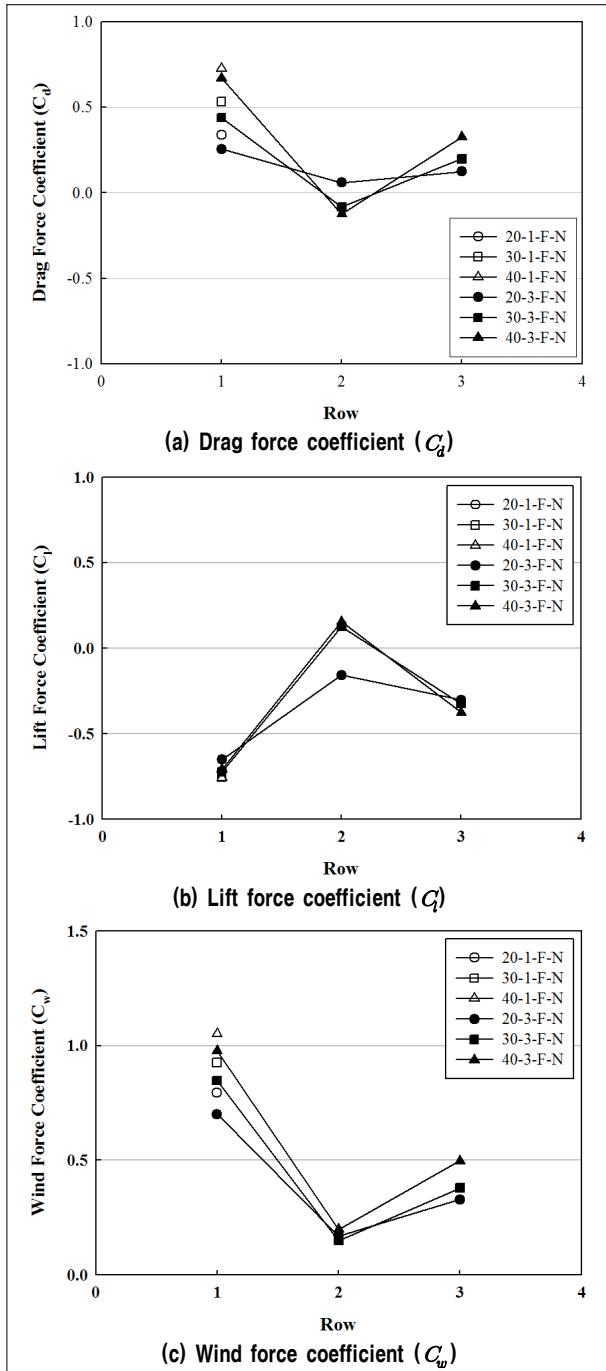


Fig. 5 Effect of the arrangement (Fair wind)

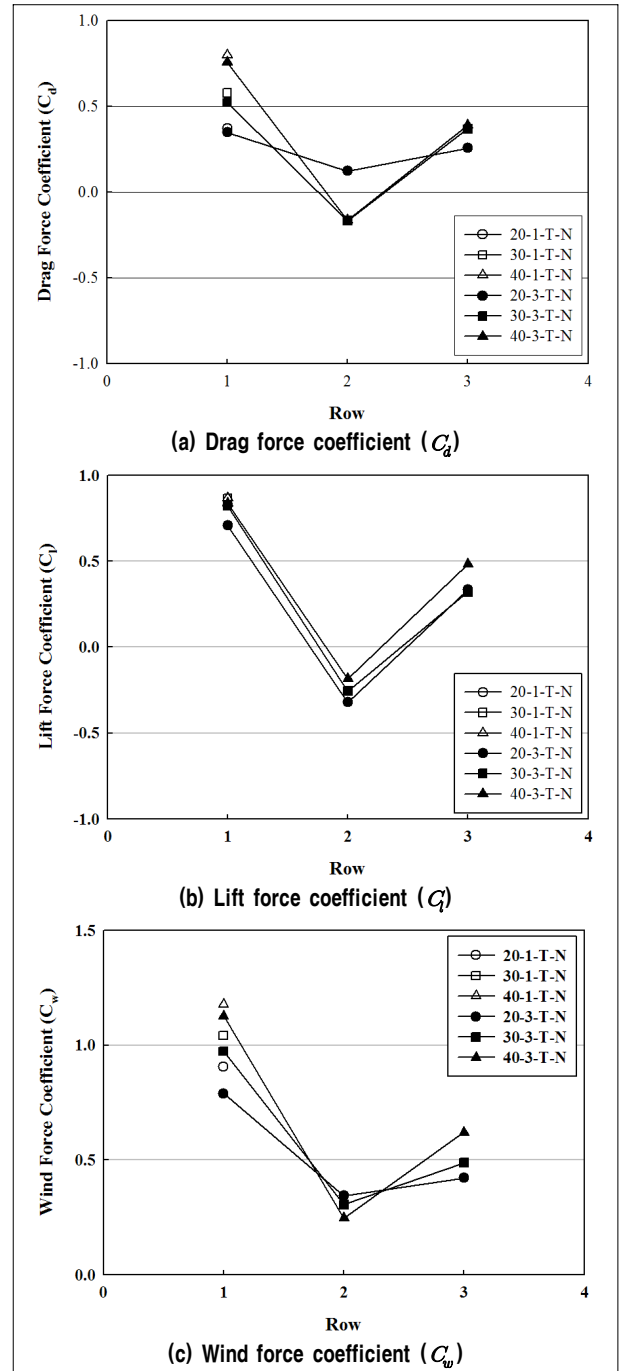


Fig. 6 Effect of the arrangement (Tail wind)

되는 것을 알 수 있다.

3.2.3 바람방향에 따른 영향

실험결과에서 단독배치의 경우에는 순풍에 비하여 역풍의

경우가 대체적으로 큰 풍력계수를 나타내고 있다. 이것은 같은 경사각도에서 순풍과 역풍이 작용되는 투영면적은 동일하지만 패널의 항력계수가 역풍일 경우에 더 커지기 때문인 것으로 판단된다.

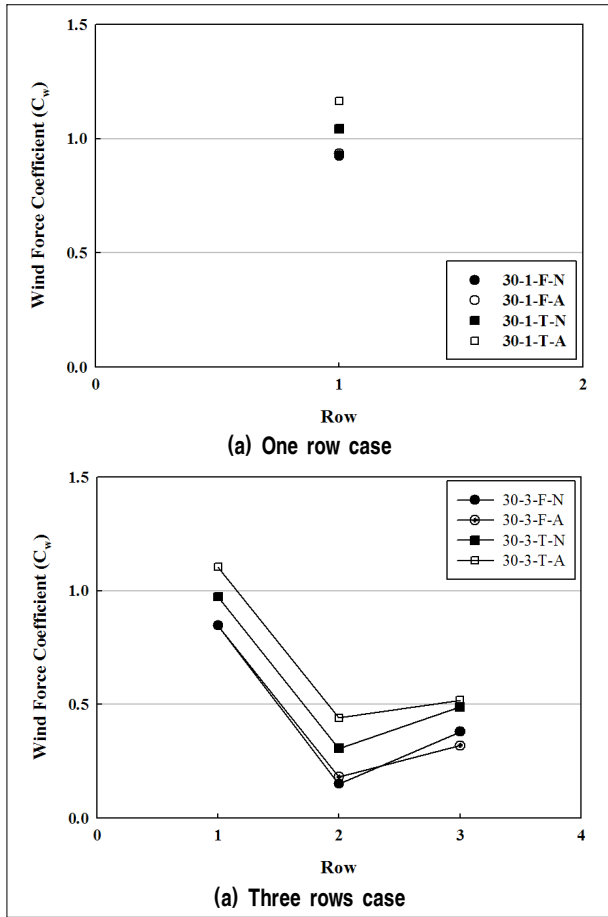


Fig. 7 Effect of the attached frame

3.2.4 프레임부착에 따른 영향

프레임이 부착된 실험체인 30-1-F/T-N/A, 30-3-F/T-N/A를 분석하여 Fig. 7에 나타내었다. 단독배치와 병렬배치 모두 순풍의 경우에는 거의 유사한 값을 나타내고 있으나, 역풍의 경우에는 프레임을 부착함에 따라 풍력계수가 증가됨을 알 수 있었다. 역풍에서 프레임의 부착에 따라 풍력계수가 증가되는 현상은 프레임의 부착위치가 태양광프레임의 배면이기 때문에 순풍의 경우보다 역풍의 경우에 유체의 흐름 방향에 위치한 프레임에 의한 저항의 영향이라고 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 수상 태양광발전 시스템의 설계 및 시공에

대한 연구의 일부로서 태양광 패널과 지지프레임에 대하여 풍하중의 기본적인 특성을 명확히 하기 위한 목적으로 풍동 실험을 실시하여 정적풍하중계수를 구하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 단독배치와 병렬배치의 1행과 3행에서는 태양광패널의 경사각도가 20도, 30도, 40도로 증가함에 따라 풍력계수가 선형으로 증가한다. 그러나 병렬배치의 2행은 일정한 경향을 보이지 않았다.
2. 단독배치의 경우에 병렬배치보다 풍력계수가 크게 나타났으며, 병렬배치에서는 총 3개의 행에 가해지는 공기력 중에서 1행이 59.5%, 2행이 12.3%, 3행이 23.2%의 풍하중을 부담함을 알 수 있었다.
3. 태양광패널의 경사각도가 20~40°내에서는 순풍에 비하여 역풍일 경우의 풍력계수가 크다.
4. 순풍의 경우에는 지지프레임의 부착 여부에 따라 풍력계수의 차이가 거의 없었으나, 역풍의 경우에는 지지프레임을 부착함에 따라 풍력계수가 증가되는 것을 확인하였다.

이 연구에서는 국내에서 일반적으로 사용하는 경사각도에 대하여 1행과 3행의 두가지 조건을 고려하여 풍동실험을 실시하였으나, 실제로 대단위로 설치되는 구조물은 더욱 많은 행의 배치가 이루어 질 것이다. 따라서 추후 더욱 많은 행에 대한 공기력의 변화특성을 연구한다면 더욱 최적화된 풍하중을 설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 향후 연구 과제로 CFD해석을 실시하여 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 검증 및 새로운 해석을 실시할 예정이다.

추가적으로 현재 태양광 구조물의 설계에 이용되고 있는 건축구조설계기준, 도로교설계기준 등의 풍하중 산정방법에 대한 타당성을 검증하는 작업도 병행되어야 할 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업(12CCTI-C060796-02-000000)의 일환으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사드립니다.

References

- [1] The International Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Climate Change 2007, Research Report, Cambridge University Press. New York.
- [2] 이남형, 주형중, 서주원, 박건형, 김기남, 2012, 2012년 대한 토목학회 정기학술대회, pp. 2356-2359.
- [3] Shiraishi, N., Matsumoto M., and Ukita K., 1985, "Aerostatic Study on Solar Ray Receiving Panels", *Journal of Japan Wind Engineering*, No. 26, pp. 11-36. (Written in Japanese)
- [4] Matsumoto, M., Shiraishi N., Shirato H., 1990, National Symposium on Wind Engineering, pp. 329-334. (Written in Japanese)
- [5] 국토해양부 고시 제 2009-1245호, 2009, *건축구조설계기준*, 국토해양부.
- [6] 현대건설주식회사, 2012, 태양광 발전모듈 풍동실험장치 임차 및 설치지원에 관한 연구보고서, 연구보고서.
- [7] 한국풍공학회, 한국구조기술사회회사, 2010, 엔지니어를 위한 내풍공학, 기문당.

이 영 근



2008년 중앙대학교 건설환경공학부 공학사
2010년 홍익대학교 토목공학과 공학석사

현재 홍익대학교 토목공학과 박사과정
(E-mail : esdras1981@gmail.com)

이 남 형



1993년 중앙대학교 전기공학과 공학사
2007년 워싱턴주립대 전기공학 공학석사
1996-2006 한국수자원공사

현재 K-water연구원 책임연구원
(E-mail : lnhyd@kwater.or.kr)

주 형 중



2002년 단국대학교 물리학과 이학사
2004년 홍익대학교 토목공학과 공학석사
2011년 홍익대학교 토목공학과 공학박사

현재 주아이시이엔씨 대표이사 (ISIS E&C)
(E-mail : hj5898@daum.net)

윤 순 종



1980년 홍익대학교 토목공학과 공학사
1987년 홍익대학교 토목공학과 공학석사
1989년 조지아공과대학 토목공학과 공학박사

현재 홍익대학교 토목공학과 교수
(E-mail : sjyoon@hongik.ac.kr)