

솔라윙 시스템의 풍진동 특성 평가

Evaluation of Aerodynamic Performance of Solar Wing System

김 용 철*
Kim, Yong Chul

윤 성 원**
Yoon, Sung-Won

Abstract

Aerodynamic performance of solar wing system has been evaluated through wind tunnel test. The test model has 12 panels, each supported by 2 cables. The panels were installed horizontally flat, and gaps between panels were set constant. Sag ratios of 2% and 5%, and wind directions between 0° and 90° were considered. Mass of test model was determined considering the mass of full scale model, and Froude number and Elastic parameter were satisfied by adjusting the mean wind speed. From the wind tunnel test, it was found that the aerodynamic performance of the solar wing system is very dependent on the wind directions and sag ratios. When the sag was 2%, the fluctuating displacements between the wind directions of 0° and 30° increase proportionally to the square of the mean wind speed, implying buffeting-like vibration and a sudden increase in fluctuating displacement was found at large mean wind speed for the wind directions larger than 40°. When the wind direction was larger than 60°, a sudden increase was found both at low and large mean wind speed. When the sag ratio is 5%, distribution of mean displacements is different from that of sag ratio of 2%, and the fluctuating displacements show very different trend from that of sag ratio of 2%.

Keywords : Solar wing system, Wind tunnel test, Instability vibration, Sag ratio

1. 서론

지구온난화와 국제유가의 불안 그리고 화석연료의 고갈에 대비한 각국의 에너지원의 다양화와 국제적인 환경규제에 능동적으로 대처하기 위해 자연 에너지를 최대로 이용한 친환경 재생에너지 산업에 대한 관심이 높아지고 있다. 현재 사용되거나 연구가 진행 중인 친환경 재생에너지원은 태양광발전을 비롯한 풍력, 수력, 바이오매스, 지열, 해양에너지와 폐기물에너지 등으로, 에너지의 해외 의존도가 95% 이상인 우리나라에서도 연구개발이 시급한 분야라고 할 수 있다. 재생에너지 중에서도 태양광발전은 실용적이면서도 활용적인 면에서도 이용 가치가 높은 에너지원으로 평가받고 있다. 또 2차 폐기물의

발생이 적고 운전유지비가 적게 든다는 이점도 있어, 우리나라의 미래 국가비전으로 선포된 저탄소 녹색성장 정책에 부합된 에너지원이라고 할 수 있다.

태양광발전에 일반적으로 사용되는 태양열전지판은 지상에 철틀 등으로 골조를 설치하고 그 위에 태양열전지판을 나열하여 에너지를 얻는 것으로, 현재에는 생산의 효율성을 높이기 위해 대규모로 태양열전지판을 설치하여 메가와트급의 전력을 생산하고 있다. 그러나 국토가 좁고 산악지역이 많은 우리나라에는 태양열전지판만을 위한 대규모의 토지를 확보하기가 어려워 메가와트급의 전력생산을 위한 대규모 단지를 확보하기는 현실적으로 어렵다.

이를 해결하기 위한 한 가지 방법으로 유럽을 중심으로 태양열전지판을 지상에 설치하는 대신 케이블을 이용하여 설치하는 방법이 사용되고 있다(솔라윙 시스템, Solar wing system, <Fig. 1>¹⁻⁵). 태양열전지판을 케이블에 설치함으로써, 설치비 및 유지비가 감소되고, 지상부분을 주차장이나 창고 혹은

* 교신저자, 동경공예대학교 건축학과 부교수, Ph.D.
Tokyo Polytechnic University
Tel: +81-(0)46-242-9521 Fax: +81-(0)46-242-9521
E-mail: kimyc@arch.t-kougei.ac.jp

** 정회원, 서울과학기술대학교 건축학부 교수, 공학박사
Seoul National University of Science & Technology

공원 등과 같은 공간으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 또 태양의 위치에 따라 케이블의 높낮이와 각도를 적절히 조절함으로써 생산의 효율을 극대화할 수 있다는 장점도 있다. 이론적으로, 지상에 설치하는 태양열전지판보다 41% 정도 생산 효율이 상승하고, 지중해에 설치된 솔라윙 시스템의 실측에 의해서도 31% ~ 36% 정도 효율이 상승하였다는 연구도 있다¹⁾. 케이블에 설치된 구조물의 경우 횡강성이 약해 바람에 의해 매우 민감한 거동을 한다는 사실은 잘 알려져 있지만, 솔라윙 시스템의 생산 효율 및 유지관리에 대한 연구는 유럽을 중심으로 몇몇 있지만, 솔라윙 시스템 대한 풍동실험 결과는 아직 보고되지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 지상에 설치하는 기존의 태양열전지판을 대신할 수 있는 새로운 시스템인 솔라윙 시스템을 대상으로 풍동실험을 통하여 풍진동 특성을 검토하였다.

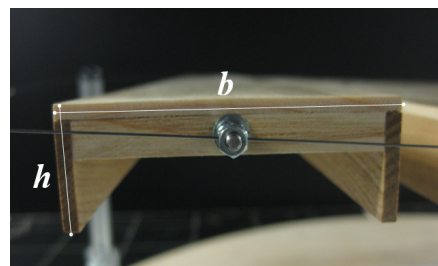
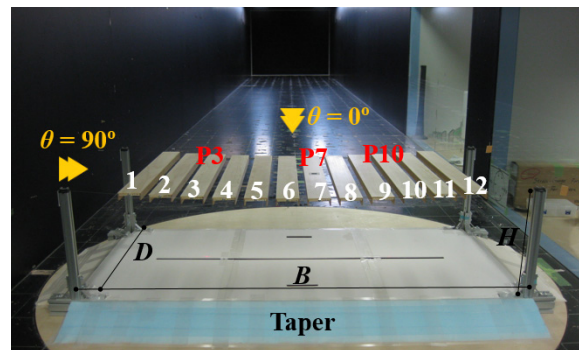


〈Fig. 1〉 Installation of solar wing system²⁾

2. 풍동실험

〈Fig. 2〉에 풍동실험모형을 나타내었다. 12개의 패널이 양측 케이블에 의해 지지된 축소모형으로, 한 개의 패널은 6개의 태양열전지판 모듈과 이를 지지하는 서포터로 구성되어 있다. 태양열전지판 모듈과 이 모듈을 지지하기 위해 양측에 설치된 서포터의 형상을 고려하여 〈Fig. 2〉에 나타낸 것과 같이 패널의 단면 형상을 Π 로 하여 최대한 실제 모형과

유사하게 제작하였다. 각 패널과 케이블은 한 점에서 접합되도록 설계하였다. 케이블을 고정시키는 양측 기둥 사이의 폭(B)과 깊이(D)는 각각 20m와 9.95m이고, 패널 한 개의 폭(b)과 높이(h)는 각각 0.992m와 0.34m이다. 솔라윙 시스템의 장점 중 하나는 지상을 주차장이나 도로와 같은 다른 용도로 사용할 수 있다는 점으로, 이를 고려하여 기둥의 높이(H)는 5m로 하였다. 실험 모형의 패널 한 개의 중량은 실제 태양열전지판 모듈(6개)과 서포터의 중량을 고려하여 구하였고, 시스템 전체의 중량은 케이블의 중량까지 고려하여 구하였다. 각 패널 사이의 거리는 일정하게 설계하였고, 처짐비(중앙부 처짐 (s) / 전체 폭(B) \times 100, 〈Fig. 3〉)는 2%와 5% 두 가지 경우를 고려하였다.



〈Fig. 2〉 Setting of solar wing system(top) and close-up view of a panel(bottom)

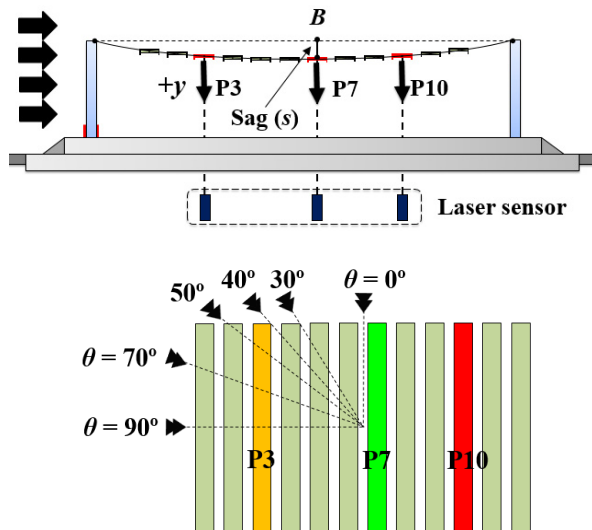
풍동실험의 길이스케일은 1/13.3, 속도스케일은 1/3.6로 설정하였다. 실제 솔라윙 시스템의 설계풍속은 5m/s ~ 45m/s로, 실제 시스템의 Froude number F_n 와 Elastic parameter E_p 를 만족하도록 풍동실험의 평균풍속을 0m/s에서 약 16m/s까지 변화시켰다. Froude number F_n 와 Elastic parameter E_p 는 식 (1)과 (2)로부터 구하였다.

$$F_n = \frac{U}{\sqrt{gB}} \quad (1)$$

$$E_p = \frac{EA}{B^2 \rho_a U^2} \quad (2)$$

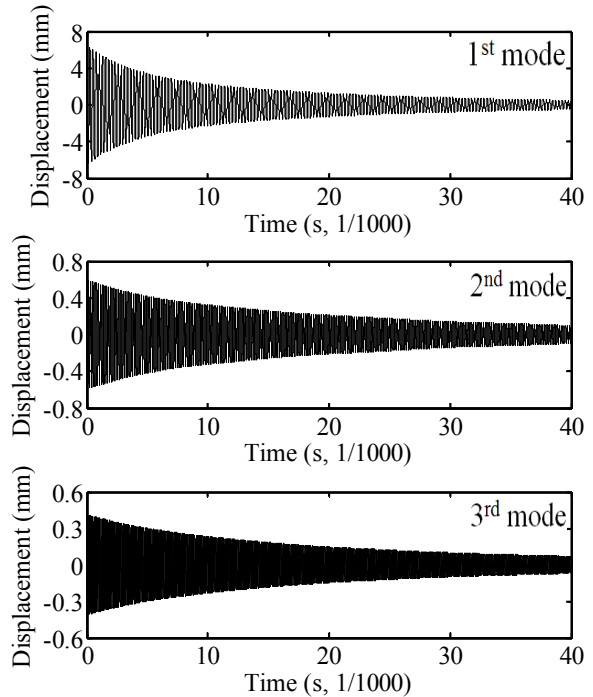
여기서,

U 는 평균풍속(m/s), g 는 중력가속도(m/s²), B 는 전체 폭(m), E 는 탄성계수(N/mm²), A 는 단면적(m²), ρ_a 는 공기밀도(kg/m³).



<Fig. 3> Definition of displacement(top) and wind direction(bottom)

12개의 패널 중 패널 3(P3), 패널 7(P7)과 패널 10(P10)의 수직변위를 레이저 변위계(기준거리 약 500mm, 측정거리 약 -250mm ~ +500mm)를 이용하여 계측하였다. <Fig. 3>에 나타난 것과 같이 아래 방향을 +로 정의하였고, 레이저 변위계의 샘플링 주파수는 300Hz로 설정하였다. 실험기류로 난류강도가 매우 작은 균등류를 대상으로 하였고($I_u = 0.3\%$), 풍향은 0°에서부터 90°까지 변화시켰다. 자유진동과형으로부터 구한 시스템의 저차 3차 모드의 고유진동수는 3.8Hz, 6.2Hz, 9.3Hz이고, 감쇠율은 0.28%, 0.14%, 0.1%이다. 저차 3차 모드의 자유진동과형을 <Fig. 4>에 나타내었고, 실험에 사용된 스케일을 <Table 1>에 정리하였다.



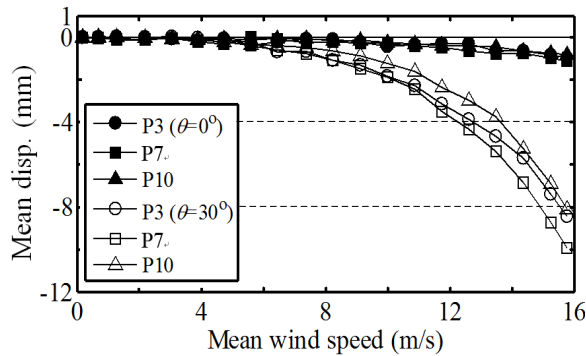
<Fig. 4> Free vibrations of the lowest three modes.

<Table 1> Experimental conditions

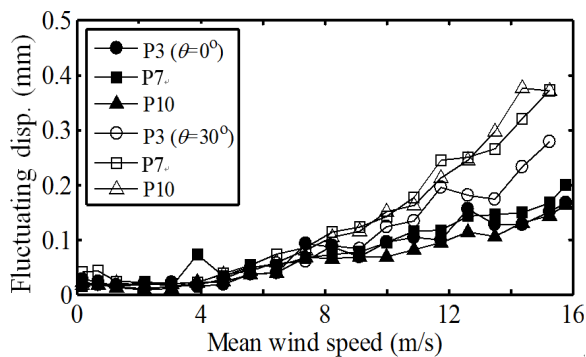
	Full	Model	Scale
B (m)	20	1.5	1/13.3
b (m)	0.992	0.07	
D (m)	9.95	0.75	
H (m)	5	0.38	
h (m)	0.34	0.03	
sag (m)	0.4 (2%) 1 (5%)	0.03 0.07	
Total weight (N)	64331.2	27.34	1/2352.6 (1/13.3 ³)
Weight of 1 panel (N)	5154.6	2.19	
Weight of cable (N)	2476	1.05	
Mean wind speed (m/s)	~ 57	~ 15.8	1/3.6

3. 실험결과 및 고찰

<Fig. 5>와 <Fig. 6>에 풍향이 0°에서 30° 사이에서의 평균변위와 변동변위의 평균풍속에 따른 변화를 나타내었다(처짐비가 2%인 경우). 풍향이 0°에서 30°로 변함에 따라 평균변위는 크게 증가함을 알 수 있고, 평균변위가 -임을 고려할 경우, 각 패널은 모두 위쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. 변동변위도 평균변위와 같이 풍향이 커짐에 따라 증가하고, 평균풍속에 대해서는 천천히 증가하는 경향을 보이나, 대체로 평균풍속의 제곱에 비례하는 경향을 보였다. 이로부터 풍향이 0°에서 30°사이의 경우에는 버페팅과 같은 진동특성이 나타남을 알 수 있다.

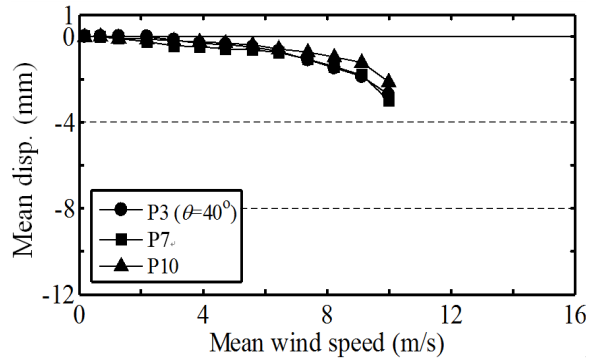


<Fig. 5> Mean displacement at the wind direction of 0° ~ 30°(sag ratio of 2%)

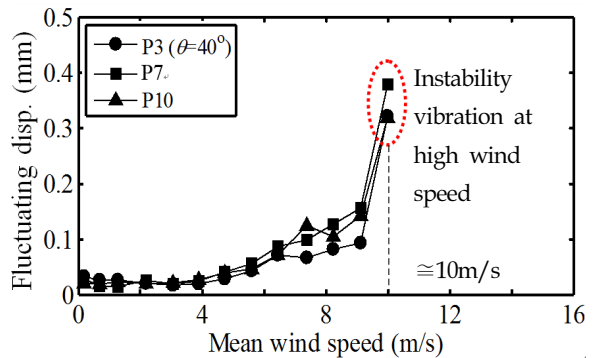


<Fig. 6> Fluctuating displacement between the wind direction of 0° and 30°(sag ratio of 2%)

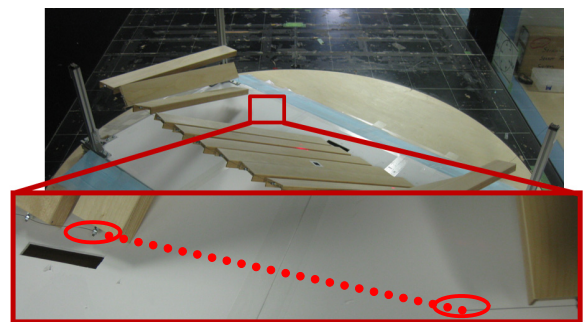
그러나 풍향이 40°로 바뀔 경우, 평균변위(<Fig. 7>)는 평균풍속에 대해 천천히 증가하지만, 변동변



<Fig. 7> Mean displacement at the wind direction of 40°(sag ratio of 2%)



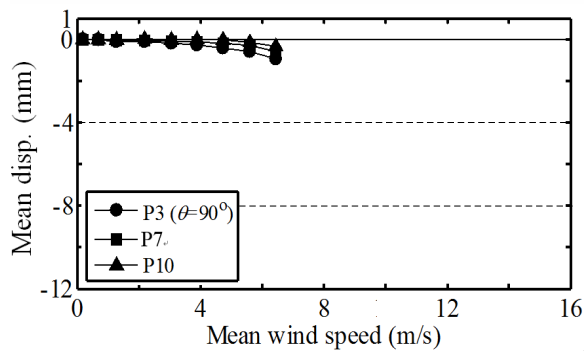
<Fig. 8> Fluctuating displacement at the wind direction of 40°(sag ratio of 2%)



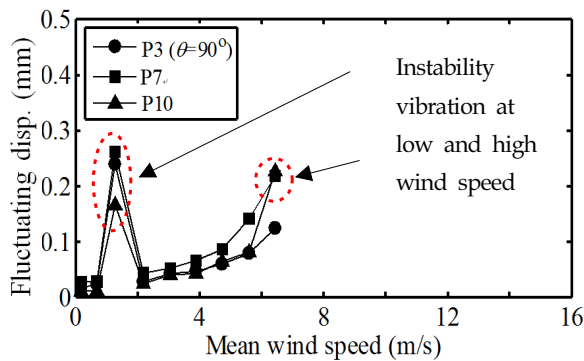
<Fig. 9> Failure of cable at the wind direction of 40°(sag ratio of 2%)

위의 경우(<Fig. 8>), 평균풍속 약 10m/s 부근에서 급격히 증가하였고, 패널을 케이블에 접합시키는 부분의 케이블이 끊어져 실험이 중단되었다(<Fig. 9>). 실제 풍속으로 환산하면 약 36m/s에 해당하는 풍

속으로, 고풍속영역에서의 변동변위의 이러한 경향은 풍향이 40°보다 큰 경우에 나타났다. 즉, 실제 솔라링 시스템의 경우 특정 풍향에서 평균풍속이 클 경우, 패널의 심한 진동으로 케이블이 갑자기 끊어져 시스템이 붕괴될 수 있음을 알 수 있다. 이후의 실험에서는 특정 평균풍속에서 변위가 급격히 증가하였을 경우에는 실험을 중단하고, 다음 풍향에 대한 실험을 진행하였다.



<Fig. 10> Mean displacement at the wind direction of 90°(sag ratio of 2%)

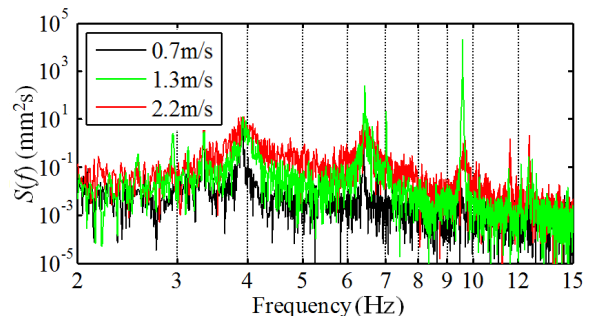
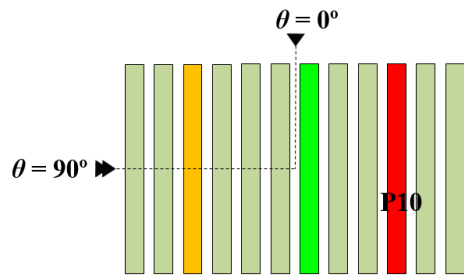


<Fig. 11> Fluctuating displacement at the wind direction of 90°(sag ratio of 2%)

풍향이 90°일 때의 평균변위와 변동변위의 변화를 <Fig. 10>과 <Fig. 11>에 나타내었다. 평균풍속이 5m/s가 될 때 까지 평균변위는 거의 변화가 없지만, 평균풍속 약 1.3m/s 부근에서 변동변위가 급격히 증가하는 불안정진동이 관찰되었다. 이러한 저풍속영역에서의 불안정진동은 풍향이 60°보다 큰 풍향에서 관찰되었고, 실제 풍속으로 환산하면 4 ~ 5m/s의 풍속으로, 풍향이 60°보다 큰 경우에 시스

템은 바로 파괴되지 않더라도, 피로파괴에 대한 정기적인 검토가 필요하다는 사실을 알 수 있다. 그리고 평균풍속이 약 6m/s일 때 패널 7 (P7)의 변동변위가 급격히 증가하는 불안정진동을 관찰할 수 있었고, 불안정진동이 발생하는 고풍속영역에서의 평균풍속은 풍향이 증가함에 따라 작아진다는 특징이 있었다.

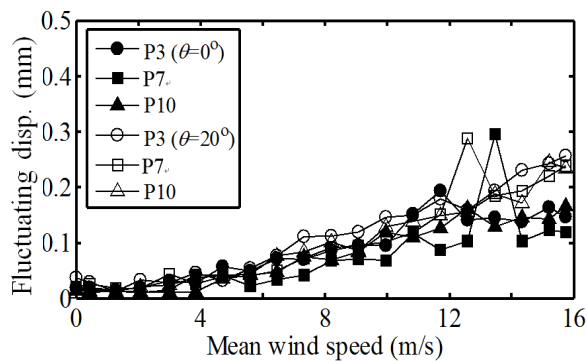
<Fig. 12>에 처짐비가 2%이고, 풍향이 90°일 때의 패널 10(P10)의 파워스펙트럼을 나타내었다. 불안정진동이 나타나기 바로 전 평균풍속의 파워스펙트럼(검은색)과 불안정진동 직후의 평균풍속에서의 파워스펙트럼(붉은색)도 동시에 나타내었다. 시스템의 고유주파수인 약 4Hz 부근에서 동시에 피크가 나타남을 알 수 확인할 수 있고, 불안정진동이 발생한 평균풍속에서의 파워스펙트럼의 경우, 주파수가 6.4Hz와 9.6Hz 부근(2차 모드와 3차 모드에 해당)에서 다른 평균풍속의 파워스펙트럼에 비해 파워가 매우 커짐을 알 수 있다. 특히 주파수가 9.6Hz인 경우의 피크는 다른 경우에 비해 약 1000배 정도 큰 값을 보이고 있어, 주파수가 9.6Hz인 성분이 불안정진동에 미치는 기여도가 매우 큼을 알 수 있다.



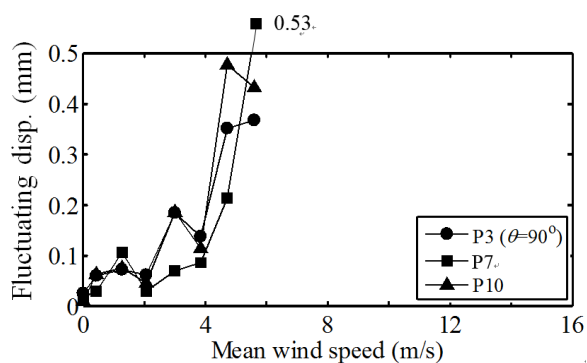
<Fig. 12> Power spectrum of panel 10(P10) at the wind direction of 90°

처짐비가 5%인 경우 풍향 0° ~ 20°와 90°에서의

변동변위의 평균풍속에 따른 변화를 각각 <Fig. 13> 과 <Fig. 14>에 나타내었다. 풍향이 0° ~ 20°인 경우 변동변위는 처짐비가 2%인 경우와 마찬가지로 평균풍속에 대해 천천히 증가함을 알 수 있지만, 증가하는 비율은 처짐비가 2%에 비해 작음을 알 수 있다. 풍향이 90°로 바뀔 경우, 변동변위는 평균풍속이 약 4m/s보다 큰 풍속영역에서는 급격히 증가하여 처짐비 2%보다 훨씬 큰 값을 보임을 알 수 있다. 그리고, 저풍속영역에서 관찰되었던 불안정진동은 처짐비가 큰 경우에는 명확하게 확인할 수 없었다.



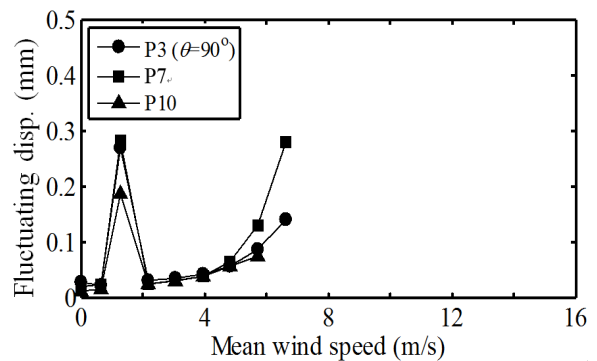
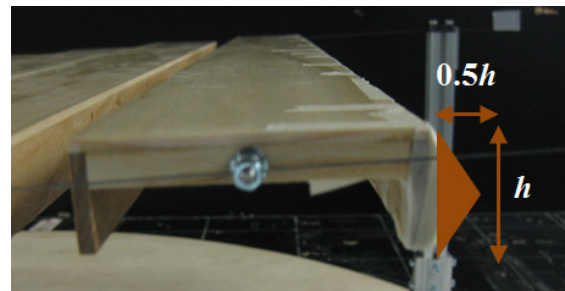
<Fig. 13> Fluctuating displacement between the wind direction of 0° and 20°(sag ratio of 5%)



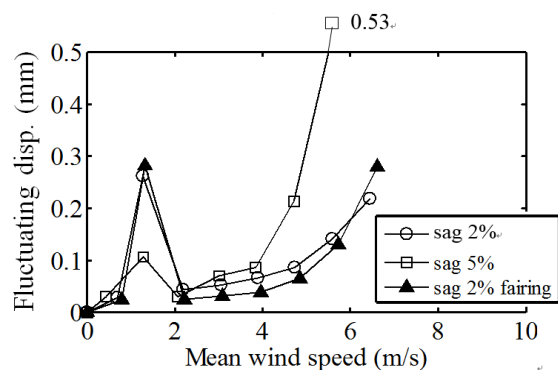
<Fig. 14> Fluctuating displacement at the wind direction of 90°(sag ratio of 5%)

처짐비가 2%인 경우, <Fig. 11>에서 보인 저풍속 영역에서 발생하는 불안정진동을 억제하기 위해 풍향이 90°인 경우 <Fig. 15>에서와 같이 가장 풍상측 패널에 삼각형 모양의 페어링을 설치한 후 실험을

진행하였다. 페어링은 교량의 풍진동을 억제하기 위해 사용되는 한 방법으로, 페어링의 크기에 따라 진동특성이 달라지지만, 본 실험에서는 이등변 삼각형 모양의 페어링을 사용하였다. <Fig. 15>에 나타난 것과 같이 페어링이 설치된 상태에서도 불안정진동이 나타나 페어링의 효과는 거의 없음을 알 수 있었다.



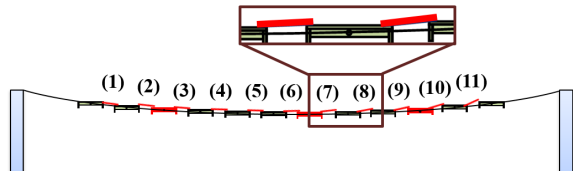
<Fig. 15> Shape of fairing(top) and fluctuating displacement at the wind direction of 90°(bottom, sag ratio of 2%)



<Fig. 16> Comparison of fluctuating displacement at the wind direction of 90°

<Fig. 16>은 처짐비와 페어링의 유무에 따른 변동변위를 비교한 것으로, 페어링의 효과는 거의 없

음을 알 수 있고, 처짐비가 증가하면 저풍속영역에서의 변동변위는 작아지지만, 평균풍속이 증가함에 따라 변동변위는 급격하게 증가함을 알 수 있었다.



<Fig. 17> Light sheets between intervals(wind blows from left to right)

<Table 2> Occurrence of instability vibration

Position of light sheet	Occurrence of instability vibration (◎ : occurred, × : not occurred)
(1) ~ (11)	×
(2) ~ (11)	×
(3) ~ (11)	×
(4) ~ (11)	×
(5) ~ (11)	×
(6) ~ (11)	×
(7) ~ (11)	×
(8) ~ (11)	×
(9) ~ (11)	×
(10) ~ (11)	×
(11)	◎
(10)	◎
No light sheets	◎

저풍속영역에서의 불안정진동을 억제하는데 페어링의 효과가 없음을 확인 한 후, 다음과 같은 추가 실험을 수행하였다. <Fig. 17>과 같이 시스템의 전체 중량에 영향을 미치지 않도록 가벼운 종이를 사용하여 패널 사이의 간격을 막은 후, 실험을 수행하여 불안정진동의 발생유무를 관찰하였다. 먼저 모든 패널 사이의 간격을 막은 후, 불안정진동의 발생유

무를 확인 후, 종이 (1)을 제거하였다. 종이 (1)만 제거된 상태에서 다시 불안정진동의 발생유무를 확인하였고, 다시 종이 (2)를 제거한 후(종이 (1)과 종이 (2)만 제거된 상태), 발생유무를 확인하였다. 이러한 방법으로 종이를 (1)부터 하나씩 하나씩 종이를 제거한 후 불안정진동의 발생유무를 확인하였고, 결과를 <Table 2>에 나타내었다.

<Table 2>에 나타낸 것과 같이 패널 10과 패널 11 사이의 간격 (10)과 패널 11과 패널 12 사이의 간격 (11)이 모두 열린 상태이거나 둘 중 하나면 열린 상태이더라도 불안정진동은 발생하였다. 즉, 간격 (10)과 (11)이 불안정진동의 발생과 밀접한 관계가 있는 것으로 확인하였으나, 패널사이의 간격((10)과 (11))과 불안정진동의 발생과정과의 정확한 관계를 본 실험에서는 자세하게 검토할 수 없었다. 패널의 단면 형상이 Π 로, 초기의 타코마교의 단면 형상과 매우 유사하다는 것으로부터, 패널 사이의 거리와 패널의 단면 형상이 불안정진동의 발생 메커니즘과 어떠한 관계가 있을 것으로 추측되고, 이 부분에 대해서는 앞으로 연구를 더욱 진행할 계획이다.

4. 결론

산악지역에서도 적용 가능한 솔라링 시스템을 대상으로 풍진동 특성을 검토하여, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 풍향이 0°에서 30°사이에서 평균변위와 변동변위는 평균풍속에 대해 천천히 증가하는 경향을 보였다. 특히, 변동변위는 평균풍속의 제곱에 비례하는 버페팅진동이 주된 진동임을 알 수 있었다.
2. 풍향이 40°인 경우, 평균풍속 10m/s(실제풍속 약 36m/s) 부근에서 변동변위가 급격하게 증가함을 알 수 있었다. 고풍속에서의 이러한 경향은 풍향이 40°보다 큰 경우에 관찰할 수 있었다(처짐비가 2%일 경우).
3. 풍향이 60°보다 큰 경우, 평균풍속 약 1.3m/s(실제풍속 약 4.7m/s)에서 변동변위가 크게 증가함을 알 수 있었다. 이러한 저풍속에서의 진동은 평균풍속이 대략 1m/s ~ 1.6m/s에서 관찰할 수 있었고, 처짐비가 2%일 경우 더욱 명확하게 나타났다. 실제

풍속의 크기를 고려할 경우, 저풍속에서의 이러한 진동은 거의 매일 발생할 수 있는 것으로, 솔라링 시스템이 겹으로 보기에 손상이 없어 보이나, 피로파괴가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

4. 처짐비가 5%일 경우, 풍향이 90°이고 평균풍속이 약 4m/s(실제풍속 약 14.4m/s)보다 클 경우에 변동변위는 급격히 증가함을 알 수 있었다.

5. 저풍속에서의 불안정진동의 발생 메커니즘은 패널 사이의 간격과 패널의 단면 형상과 관계가 있는 것으로 고려된다.

for Spatial Structures, Vol.14, No.2, pp.24-27, 2014.

- Received : January 26, 2016
- Revised : February 20, 2016
- Accepted : February 20, 2016

References

1. F.P. Baumgartner, A. Büchel, R. Bartholet, "Solar wings a new lightweight PHOTOVOLTAIC tracking system", Proceedings of the 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 4DO.9.5, 2008.
2. F.P. Baumgartner, A. Büchel, R. Bartholet, "Experiences with cable -based solar wings tracking system and progress towards two-axis large scale solar systems", Proceedings of the 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Hamburg, 4CO.8.6, 2009.
3. F.P. Baumgartner, A. Büchel, R. Bartholet, "Cable-based solar wings tracking system: two-axis system and progress of one-axis system", Proceedings of the 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Valencia, 4BV.1.34, 2010.
4. J.W. Jeong, I.B. Kim, S.W. Ahn, "Free span solar array system using cable structures", Proceedings of the Korean Association for Spatial Structures, Vol.9, No.1, pp.71-72, 2013.
5. E.H. Choi, J.W. Jeong, I.B. Kim, S.W. Ahn, "Free span solar array system using cable structures", Journal of the Korean Association