

장기 모니터링을 통한 대공간 구조물의 동특성 분석

Dynamic properties of a large-span roof structure obtained from long-term monitoring



유 은 중*
You, Eun-Jong

1. 서론

일반적으로 구조설계시 혹은 사용성 및 안전성 평가시 구조물의 동특성은 고정된 것으로 생각하는 경향이 많다. 하지만 건물 및 사장교등을 대상으로 한 기존 문헌에 따르면 구조물의 동특성은 온도 및 진동의 크기, 심지어 강우여부에 따라서도 상당히 변화하는 것으로 보고되고 있다. 따라서 검토대상이 되는 하중의 종류에 따라서 사용되는 해석모델은 달라져야만 하며 그 때 사용되는 해석모델의 적합성에 대한 검증은 실측자료와의 비교를 통해서만 이루어질 수 있으나 대공간 구조물의 경우 이러한 자료는 거의 찾아볼 수 없다.

본고에서는 제주도 서귀포에 위치한 2002 월드컵 경기장의 대공간 지붕구조물에 대한 4년간의 장기모

니터링데이터를 통해 응답의 크기 및 온도에 따른 동특성의 변동에 대한 자료 및 유한요소해석과 풍동 실험의 조합을 통해 예측한 풍응답과 태풍시 실제 계측치를 비교한 자료를 소개하고자 한다.

2. 서귀포 2002 월드컵 경기장의 장기 모니터링

2.1 구조물의 개요

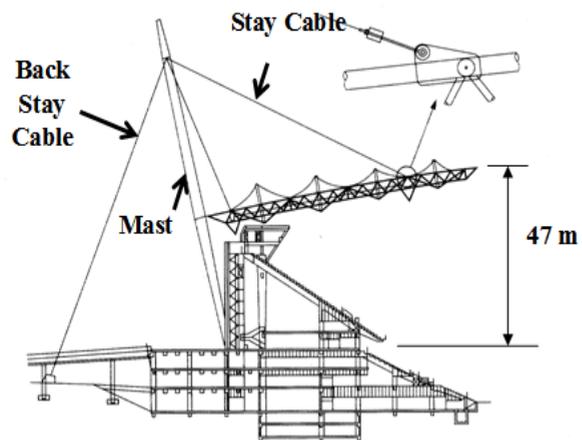
본고의 대상구조물은 서귀포시에 위치한 2002 한일월드컵 경기장의 지붕구조물이다. 경기장의 외관은 <그림 1>과 같다. 지붕의 최대 너비는 200 미터, 그리고 지상으로부터 지붕 끝까지의 최대 높이는 47 미터이다. 지붕은 강철 파이프로 이루어진 트러스구조에 테플론 시트가 덮여있는 구조를 가지고 있다. 평면도에서 보이듯이 지붕트러스는 초승달 모양을

* 정회원·한양대학교 건축공학부 조교수

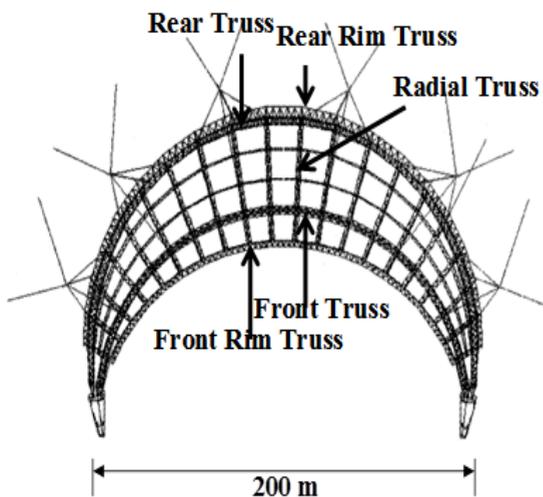
가지고 있는데 양쪽 끝에서 콘크리트기초와 연결되어 있으며 중앙부에서는 6개의 마스트에 의해 지지되고 있다. <그림 2>과 <그림 3>에서 볼 수 있듯이,



<그림 1> 서귀포 2002 월드컵 경기장



<그림 2> 지붕구조물의 입면



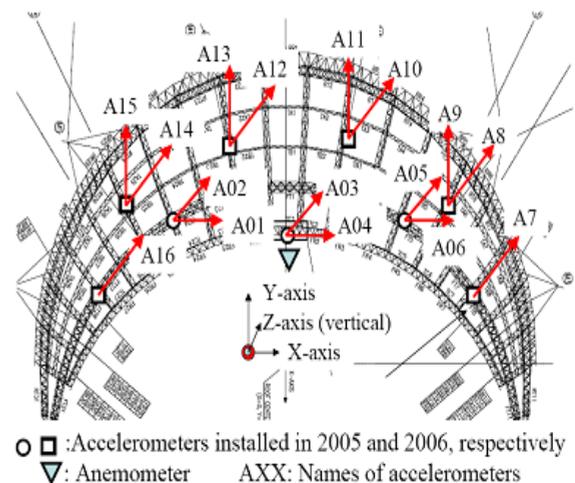
<그림 3> 지붕평면도

지붕은 마스트와 연결된 stay cable에 매달려 있으며 이 cable stay는 전도를 방지하기 위해 뒤쪽 stay cable로 지지되어 있다. 양쪽 cable stay에는 초기 장력이 가해져 있다.

2.2 모니터링 시스템

서귀포 2002 월드컵 경기장의 장기 모니터링 시스템은 <그림 4>와 같이 지붕구조물의 9개 지점에 배치된 16개의 스트레인게이지형의 가속도계와 하나의 풍속계 및 DAQ 로 이루어져 있다. 가속도계는 x, y, z축방향의 가속도를 측정할 수 있도록 <그림 4>와 같이 조합되어 있는데 x, y축 방향을 위한 가속도계는 측정가능한 최대가속도의 크기가 1g인 가속도계가, z축 방향에는 중력 가속도를 고려하여 최대가속도의 크기가 2g인 가속도계가 사용되었다. 가속도계의 신호는 독립된 앰프에 의해 증폭된 후 DAQ에 의해 디지털화되어 컴퓨터에 저장된다. A/D 변환에는 50 Hz의 안티앨리어싱(anti-aliasing) 필터가 사용되었다.

본고에서 소개되는 자료는 2005년 9월부터 2009년 2월까지 측정된 데이터의 분석결과이다. 특히 2005년 태풍 나비, 2006년 태풍 산산, 그리고 2006년의 겨울의 강풍시 측정된 데이터를 주로 사용하였다. 태풍 나비와 산산은 서귀포시에 2005년 9월 5일

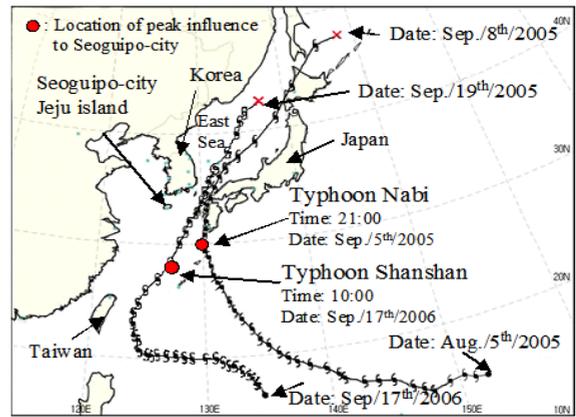


<그림 4> 가속도계와 풍속도계의 위치

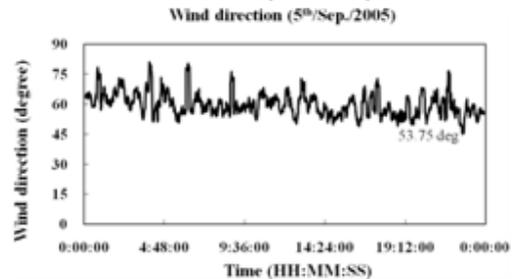
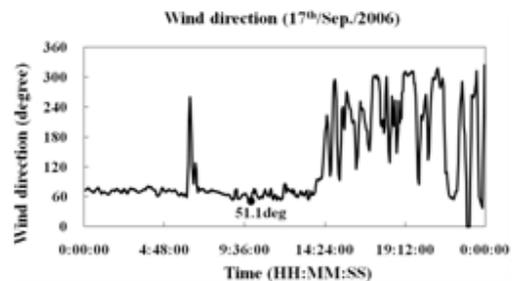
과 6일, 2006년 9월 17일과 18일에 영향을 미쳤으며 <그림 5>에는 이 태풍들의 경로가 표시되어 있다. <그림 6>은 두 태풍이 왔을 때 측정된 10분평균풍속과 풍향이 표시되어 있다. 10분평균풍속의 최대치와 그 때의 풍향은 나비의 경우 22.35 m/s와 53.75°이며 산산의 경우 17.34 m/s와 51.1°였다. 태풍이 부는 동안의 평균 풍향은 각각 59.79°와 68.20°였다. 겨울철 강풍계측 데이터는 2006년 10월 12일에서 18일의 계측데이터가 사용되었는데 겨울강풍의 10분평균풍속의 최대치는 태풍의 경우보다 매우 낮았다. 겨울강풍시 평균풍향은 50°에서 80°까지 분포했다. 이후 2008년부터 2009년에도 계측이 이루어졌는데 이들 데이터를 모두 분석하여 지붕구조물의 풍하중의 크기 및 온도의 변화에 따른 동특성의 변화를 분석하였다.

<표 1> 센서와 DAQ의 제원

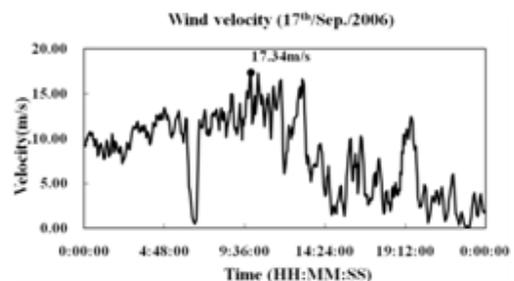
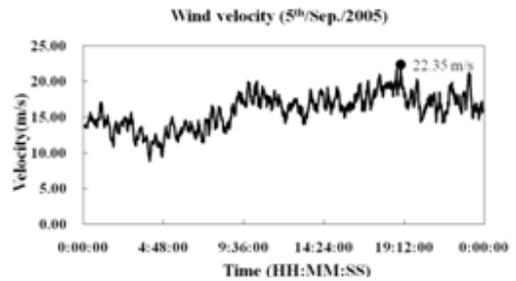
Equipment	Specifications	Total numbers
Accelerometers	- Capacity: 1g for translational; 2g for vertical directions	-2g: 9 EA
	- Strain gauge type - Manufacturer: Tokyosokki/Japan	-1g: 7EA
Amplifier	- Bandwidth: DC ~ 2.5 kHz	-16 channels
	- Range: 50,000 × 10 ⁻⁶ strain - Manufacturer: Tokyosokki/Japan	
A/D converter	- Resolution: 24-bit	-16 channels
	- No. of channel: 16-channel (Anti-aliasing filter) - Manufacturer: DEWETRON/Austria	



<그림 5> 태풍나비와 산산의 경로



(a) 태풍 나비 작용시 10분 평균풍속 및 풍향



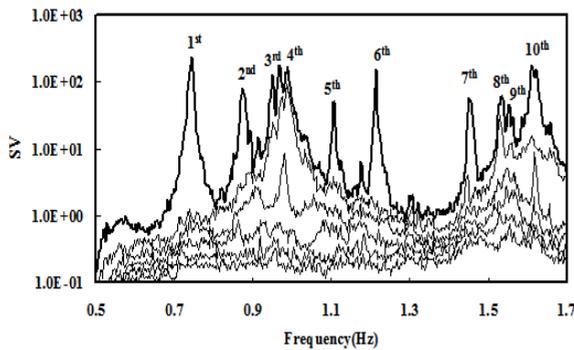
(b) 태풍 산산 작용시 10분평균풍속 및 풍향

<그림 6> 풍속 및 풍향 계측데이터

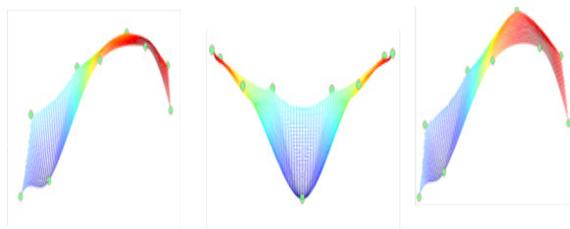
3. 동특성의 분석

3.1 구조물 식별

계측된 데이터는 적절한 신호처리과정을 거친 후 FDD(frequency domain decomposition)기법을 사용하여 동특성을 식별하였다. FDD는 계측된 신호의 cross power spectral density(CPSD) 행렬의 특이치 분해를 통해 모드를 분리하는 방법으로 <그림 7>은 그 예를 보여준다. 각 모드의 고유진동수는 피크치로부터, 감쇠비의 경우는 FDD를 통해 분해된 하나의 모드에서 로그감쇠율(logarithmic decrement) 기법을 사용하여 구하였다. 또한 모드형상은 특이치분해를 통해 구한 특이벡터로부터 구할 수 있는데 <그림 8>은 1차~3차 모드의 모드형상을 나타낸다.



<그림 7> FDD의 예

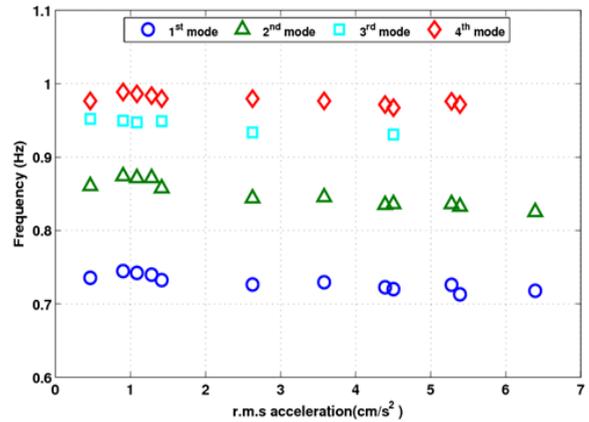


<그림 8> 구조물 식별을 통해 구한 모드 현상

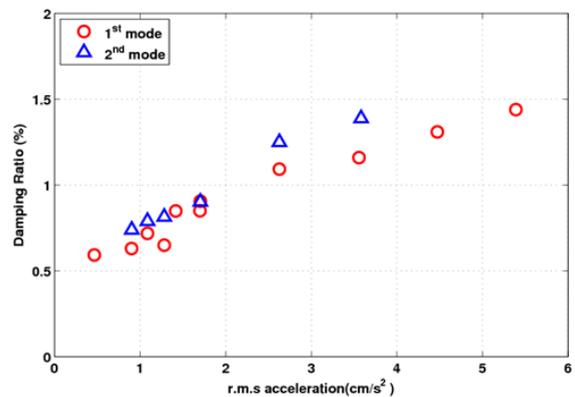
3.2 진동 진폭의 영향

일반적으로 동특성은 진동의 진폭에 따라 변화하는 것으로 알려져 있다. 태풍시에 계측된 자료라 하더라도 계측시간동안 동일한 진폭을 가지고 진동하는 것이 아니므로 계측된 데이터를 분석하여 여러

개의 샘플로 나누는 후 FDD로 동특성을 식별한 후 기준되는 가속도계 값의 r.m.s. 값을 기준으로 정렬하여 그래프로 나타내었다. 기준 가속도계는 A3를 사용하였다.



<그림 9> 기준위치 가속도의 rms 값과 고유진동수의 관계



<그림 10> 기준위치 가속도의 rms값과 감쇠비의 관계

<그림 9>와 <그림 10>은 그 결과이다. 고유진동수는 4차모드까지 구하였으며 감쇠비의 경우는 2차모드까지만 나타내었다. 이는 감쇠비의 경우는 샘플의 길이가 짧을 경우 고차모드의 값은 신뢰성이 크게 떨어지기 때문이다. <그림 10>에서 보듯이 기준 위치의 가속도 r.m.s. 값이 0.9cm/s²에서 5.39 cm/s²로 증가할 때 1차와 2차 고유진동수는 각각 4.26%과 4.75%가 감소한다. 감쇠율의 변화는 고유진동수의 변화보다 더 심하게 나타났다. 즉, r.m.s. 가속도가 0.9 cm/s²에서 5.39 cm/s²로 증가하면 1차 모드 감

쇠비는 0.63%에서 1.44%로 두배 이상 증가한다.

일반적으로 건물에서 진폭이 증가할 때 고유진동수가 감소하는 원인은 주요 구조부재의 균열 및 비구조 부재의 손상(또는 구조부재로부터의 분리)로 설명하고 있다. 비구조 부재가 없는 대공간 구조물이나 사장교의 경우 구조물에서 진폭에 따른 고유진동수의 감소에 대해서 아직 명확히 그 이유를 규명하지 못하고 있으나 기하학적 강성의 변화에 의한 것인 것으로 추측하고 있다. 또한 감쇠비가 증가하는 이유는 일반적으로 구조물 내부에서 마찰이 증가하기 때문인 것으로 생각하고 있다. 대공간 구조물의 경우는 공력감쇠현상도 그 원인의 하나로 추정되고 있으며, 본 구조물과 같이 지붕이 유연한 막으로 덮혀진 경우 강풍이 불 경우 막의 형태가 변화하고 오목한 막에 포함된 공기가 구조물의 질량으로 작용하는 소위 가중질량효과(added mass effect)의 영향도 있는 것으로 생각된다.

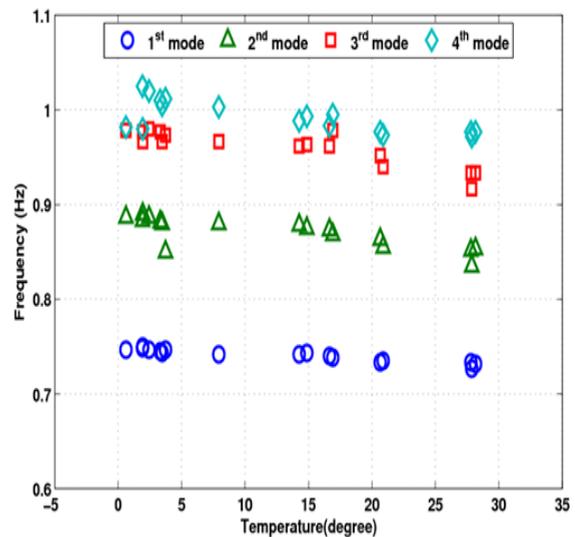
3.3 온도 변화의 영향

외기에 노출된 구조물은 온도 변화로 인해 수축과 팽창이 일어나게 된다. 이러한 수축과 팽창은 구조물의 강성에 영향을 미치고 결국 고유진동수의 변화를 일으킨다. 온도 변화에 따른 동특성의 분석도 진폭에 대한 동특성의 변화분석과 유사한 방법을 통해 이루어졌다. <표 3>은 온도변화에 따른 동특성분석을 위해 선택한 샘플과 그때의 기온이다. 표에 나타난 것처럼 온도변화만이 영향을 미치도록 하기 위해 평균풍속이 낮은 경우의 샘플을 선택하였다. <그림 11>은 <표 3>에 나타난 날짜의 샘플을 사용하여 분석한 결과이다. 그림에 나타난 바와 같이 온도가 27.8° C에서 0.6° C로 27.2° C가 감소하는 동안 1차~4차 고유진동수는 2.5%, 4.3%, 5.0%, 4.9% 증가하였다. 대공간구조물에서 온도변화에 따른 고유진동수의 변화를 분석한 자료는 찾아볼 수 없으나, 다른 종류의 구조물을 대상으로 한 기존문헌에 의하면 사장교의 경우 기온이 약 50° C 변화할 때 1

차~10차 모드고유진동수가 0.2%~1.25% 변화하였다는 자료가 있으며 (Ting Kau 사장교), 콘크리트 굴뚝의 경우 약 5° C의 일교차에 대해 1% 정도의 고유진동수변화가 있다고 보고된 바가 있다. 따라서 <그림 11>의 변화량은 다른 종류의 구조물들에 비하여 다소 높은 수치이다. 정확히는 알 수 없으나 본 구조물의 경우 Cable stay에 가해진 인장력이 온도에 따라 변화하며 이것이 전체 구조의 동특성이 큰 영향을 미치는 것으로 추정되고 있다.

<표 3> 온도변화에 따른 동특성변화 분석을 위해 선택된 날의 온도와 풍속

Year	2008				2009	
Date	07/20	09/30	12/05	12/20	01/12	
Temperature (°C)	Mean	27.6	20.6	4.2	15.7	2.1
	Max.	28.7	22.1	9.1	18.4	4.9
	Min	26.2	18.9	1.6	11.5	-0.7
Daily mean wind velocity (m/s)	4.0	4.4	4.5	3.5	3.5	



<그림 11> 온도에 따른 고유진동수의 변화

6. 결론

현장에서 실측한 데이터들은 다양한 외부적 영향에 의한 구조물의 행동을 이해하고 예측하는데 밑거름이 된다. 고층빌딩과 같은 건축구조물 혹은 사장교 등의 구조물에서 장기모니터링을 통해 환경변화에 따른 동특성변화를 분석한 자료는 다소 찾아볼 수 있으나, 본고와 같이 장경간 지붕구조물에 대한 자료는 거의 찾아볼 수 없다. 본고에서는 4년이 넘는 기간동안 서귀포 2002 월드컵 경기장의 철골트러스 지붕구조물에 대한 풍하중과 가속도응답 계측 데이터로부터 시스템식별을 통해 구조물의 동적 특성을 분석한 자료를 소개하였다. 즉, 계측된 데이터로부터 고유진동수, 감쇠비와 같은 동특성이 진동의 크기 및 주변 온도의 변화와 어떠한 관계가 있는지 조사하였다. 분석결과 진동의 진폭이 5배정도 증가할 때 고유진동수는 약 5% 감소하며 감쇠비는 두배 이상의 증가하는 것을 볼 수 있었다. 또한 온도가 27.2° C 감소할 때 고유진동수가 5%까지 증가하는 것을 볼 수 있었다. 이러한 동특성의 변화의 원인은 풍속의 변화에 따른 진동의 증가에 따른 마찰력의 증가, 기하학적인 강성의 변화, 공력감쇠효과, 가중 질량효과, 또한 온도변화에 따른 강성의 변화, 초기 장력의 변화 등 다양하게 추정되고 있으나 이를 검증하기 위해서는 정밀한 해석 및 실험을 통한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. Brincker, R., Zhang, L., Andersen, P., 2000. Modal identification from ambient responses using frequency domain decomposition, Proceedings of the 18th International Modal Analysis Conference(IMAC), San Antonio, Texas, 4062, 625-630
2. Jeary, A.P., 1986. Damping in tall buildings—a mechanism and a predictor. Earthquake Engineering and Structural Dynamics 14, 733-750
3. Kanazawa, K., Ogawa, K., Yabana, S., Miyazumi, K., 2003. Modal Characteristics Variance of a tall Reinforced Concrete Stack in a Day. J. Struct. Constr. Eng., AIJ 568, 67-74 (in Japanese)
4. Kim, J.Y., Yu, E., Kim, D.Y., Kim, S.D., 2009. Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level. Engineering Structures 31, 2086-2096
5. KSEA, 1999. Structural Design of 2002 FIFA World Cup-Korean Stadiums.
6. Ku, C.J., Tamura, Y., Yoshida, A., Kim, J.Y., Kim, D.Y., 2009. Ambient vibration analysis of a spatial structure. Proceedings of the 11th Americas conference on wind engineering. 2009.
7. Macdonald J.H.G., Daniell, W.E., 2005. Variation of modal parameters of a cable-stayed bridge identified from ambient vibration measurements and FE modeling, Engineering Structures 27, 1916-1930
8. Minami H., 1998, Added mass of a membrane vibrating at finite amplitude, Journal of Fluids and Structure 12, 919-932
9. Vickery, B.J., Majowiecki, M., 1992. Wind induced response of a cable supported stadium roof. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 42, 1447-1458
10. Wahab M.A., De Roeck, G. 1997, Effect of temperature on dynamic system parameters of a highway bridge. Structural Engineering International 7(4), 266-70.