

Pressure Integration을 이용한 대형 구조물의 풍응답 예측과 실측결과와의 비교

Evaluation of Wind-induced Responses for Large Scale Structures using Pressure Integration Method and Comparisons with Field Measurement Results



김 지 영*

* (주)대우건설 기술연구원 방재연구팀 책임연구원

1. 서론

대형 구조물의 내풍설계를 위해 반드시 평가해야 할 대표적인 항목 중의 하나로 풍응답을 들 수 있다. 초고층 건물의 경우 변위 사용성 및 거주자의 풍진동사용성을 확보하기 위해 풍동실험으로 재현기간별 풍응답을 평가한다. 그리고 대공간 구조물의 경우에는 다양한 형태의 풍응답(풍하중 영향)의 평가를 통해 풍하중 패턴을 산정하고, 이를 바탕으로 구조적으로 안정한 설계를 수행하게 된다. 일반적으로 구조설계자에게 풍동실험은 풍압실험, 풍력실험 및 풍환경실험으로 구분되어 알려져 있다. 그리고 대부분의 구조설계자에게 풍압실험은 주로 외장재 설계를 위한 국부풍압의 계측에만 적용되며 구조설계용 풍하중 및 풍응답 평가를 위해서는 풍력실험을 수행해야 하는 것으로 인식되고 있다.

그러나 세장한 초고층 건물의 경우에는 고차 진동모드의 영향이 증가하기 때문에 1차 진동모드만을 고려할 수 있는 풍력실험으로는 정확한 풍응답을 예측하기 어려운 경우가 발생한다. 또한 대공간 구조물의 경우에도 고차 진동모드가 전체 풍응답에 큰 영향을 미칠 뿐만 아니라 풍력실험 자체를 적용하기 어려운 구조이기 때문에 풍응답 및 풍하중의 산정을 위해서는 별도의 다른 방법이 필요하다. 따라서 최근 풍압계측기술의 발달에 따라 풍응답 및 풍하중의

평가에 풍압동시측정(Concurrent pressure measurements at multiple points) 풍동실험기법과 함께 풍압적분법(Pressure integration method)이 사용되고 있다. 본 기사에서는 (주)대우건설에서 수행한 풍압적분기법을 이용한 풍응답평가의 사례와 실제 태풍 시 계측을 통해 실측된 풍응답과의 비교 결과를 소개하고자 한다.

2. 풍압동시측정과 풍응답 해석

풍력실험은 그림 1과 같이 발사(나무)로 만든 실험모형을 육분력계(또는 오분력계) 위에 설치하여 풍동실험을 통해 밀면 전단력 및 밀면모멘트를 측정하는 방법이다. 따라서 모형에 작용하는 풍력의 값이 기계적으로 적분되어 분력계를 통해 기록되므로 가장 정확한 풍력을 측정할 수 있다. 그러나 높이별 풍력의 분포를 측정할 수 없기 때문에 풍하중의 분포를 가정해야 하며, 1차 진동모드만을 사용하여 풍응답을 평가하게 된다.

이러한 단점을 해결하기 위해 풍압실험을 통해 측정된 풍압을 분담면적에 대해 적분하여 풍력을 산정하는 풍압적분법(Pressure Integration Method)이 사용되고 있다. 먼저, 그림 2(a)와 같이 모형표면에 풍압공을 적절하게 배치하고 전체 풍압데이터를 동시성을 확보하기 위해 모든 측정점에서 동시에 풍압을 계측한다. 그리고 그림 2(b)와 같이 측정

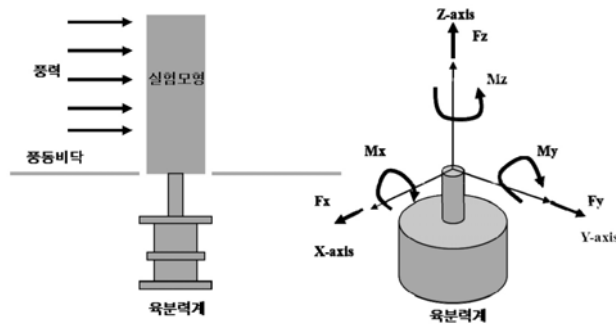
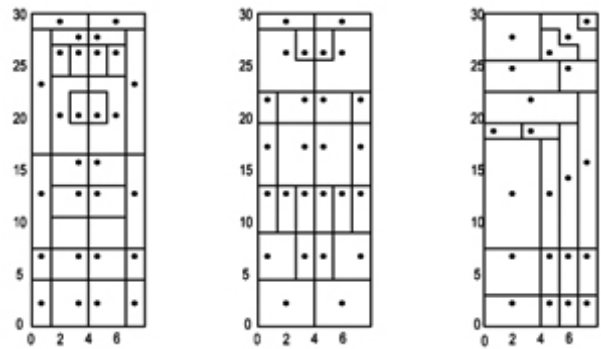
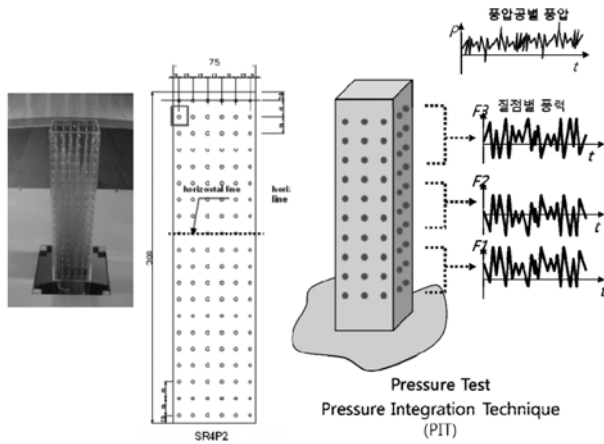


그림 1 풍력실험



(a) PAC에 의한 풍압 측정공 최적화



(a) 풍압실험 모형

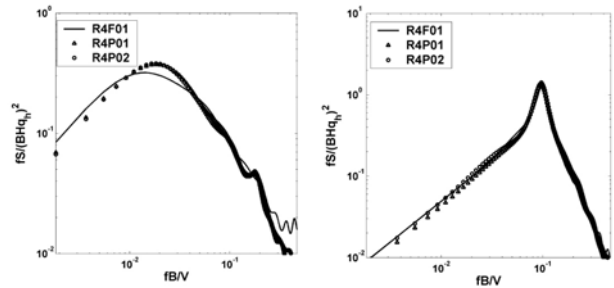
(b) 풍압적분법

그림 2 풍압동시측정을 이용한 풍압적분법

된시계열 풍압데이터를 해당 풍압공의 분담면적으로 적분하여 풍력을 산정한다. 이와 같이 풍압적분법을 이용하면 높이별 또는 임의의 위치에 작용하는 풍력을 알 수 있으며, 이를 이용하여 정확한 풍하중의 분포 및 고차모드를 반영한 풍응답을 산정할 수 있다. 모든 구조물은 풍하중에 대해 탄성설계를 하도록 되어 있으므로 일반적으로 풍응답은 시간이력해석을 통한 모드중첩법 또는 스펙트럼해석법으로 평가된다. 따라서 식 (1)과 같이 풍응답 평가를 위한 동적 해석을 위해서는 모드별 일반화하중(Generalized force)이 필요한데, 풍압적분을 통해 구한 위치별 풍력을 모드형상과 조합하여 일반화 하중을 직접 산정할 수 있다.

$$\ddot{x}_i(t) + 2\zeta_i \dot{x}_i(t) + \omega_{n,i}(t) = \frac{1}{\phi_i^T m \phi_i} \phi_i^T f_i(t) \quad (1)$$

풍압적분법의 경우 풍압측정공의 위치가 적절하지 않을 경우에는 측정된 풍력이 실제와 차이를 나타낼 수 있으므로 풍력측정의 적정성이 실험을 통해 검증될 필요가 있다. 그림 2의 각주의 경우 그림 3과 같이 풍력실험을 통해 측정된 밀면전단력 파워스펙트럼과 풍압적분에 의한 결과를



(b) 풍력스펙트럼의 비교 (— : 풍력실험, ○ : 풍압적분법)

그림 3 풍압적분과 풍력실험에 의한 풍력측정결과 비교

비교하여 풍력측정의 적정성을 평가할 수 있다. 그림 3(a)는 Pressure Attribution Coefficient (PAC)¹⁾에 의해 최적화된 풍압공의 배치이며, 그림 3(b)는 그림 3(a)의 풍압측정 데이터를 이용한 풍력스펙트럼과 풍력실험에 의한 결과를 비교한 것이다. 결과에서 나타난 바와 같이 적정한 위치에 풍압공이 설치될 경우 풍력실험의 결과와 큰 차이가 없는 풍력을 측정할 수 있는 것을 볼 수 있다.

3. 풍응답 계측

풍압적분법을 이용한 풍응답 예측결과의 적정성을 평가하기 위해 태풍발생 시 초고층 건물 및 대공간 건물 예제에 대한 풍응답 계측을 수행하였으며, 대상구조물의 형상은 그림 4와 같다. 그림 4(a)의 초고층 건물은 높이가 134m (41층)이며, 철근콘크리트조 건물이다. 그리고 대공간 지붕 구조물은 경간 200m 규모의 철골트러스이며, 중앙부는 6개의 마스트에 의해 현수되어 있는 구조이다. 대상 초고층 및 대공간 구조물에는 구조물의 풍응답 가속도 계측을 위해 24개 및 16개의 가속도 센서가 설치되었으며, 작용하는 바람의 풍속 및 풍향을 측정하기 위해 풍향풍속계를 설치하였다. 그리고 측정된 가속도 데이터를 분석하여 그림 5와 같이 대상구조물의 동적특성(고유진동수, 모드형상, 감쇠비)을 평가하였다.

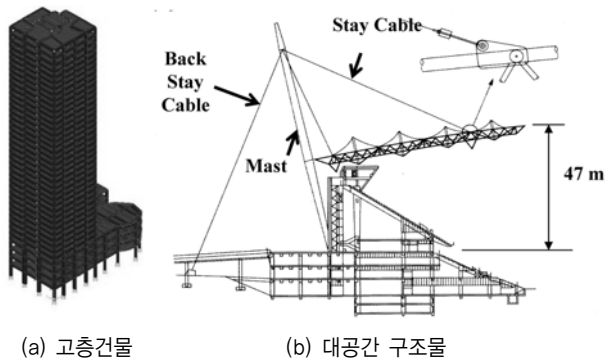
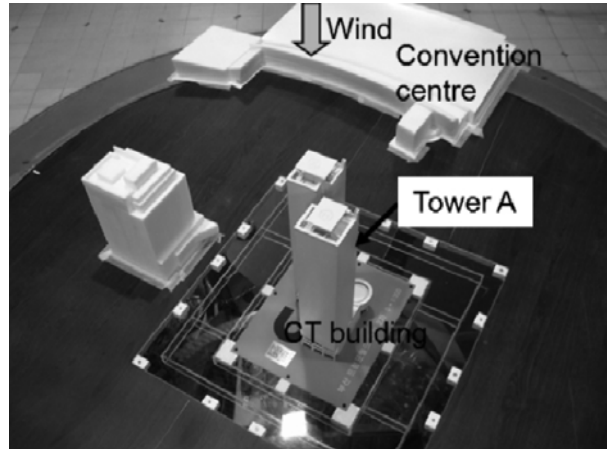
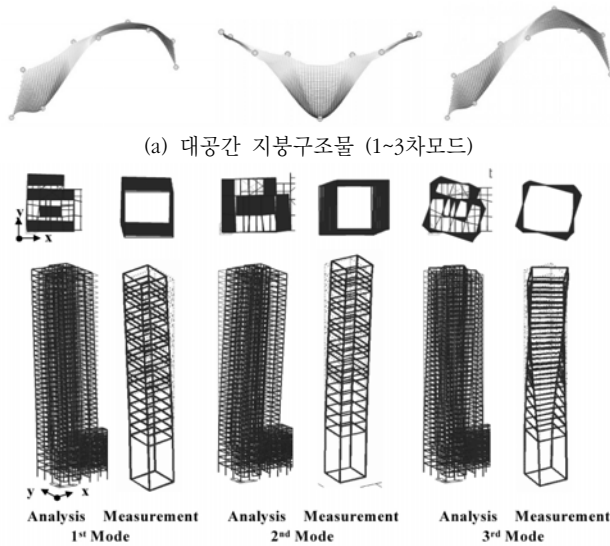


그림 4 풍응답 예측 대상구조물

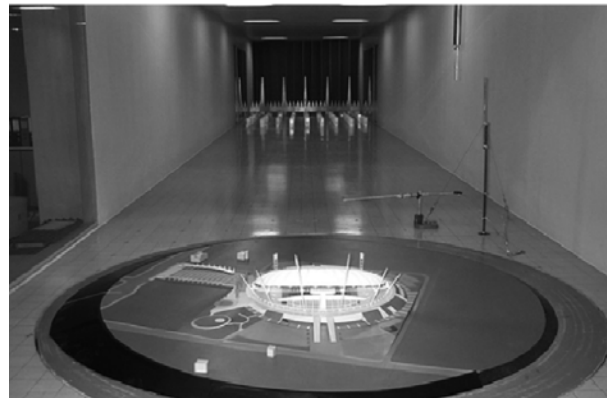


(a) 초고층 건물



(b) 초고층 건물

그림 5 가속도 데이터를 이용한 모드형상 추출



(b) 대공간 지붕

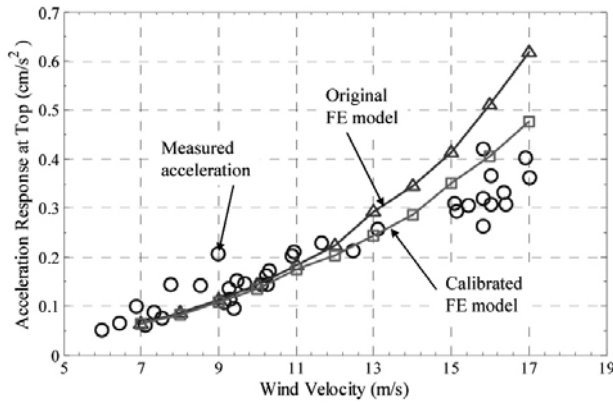
그림 6 대상 구조물 풍동실험 전경

4. 풍동실험을 이용한 풍응답 평가 및 예측 결과와의 비교

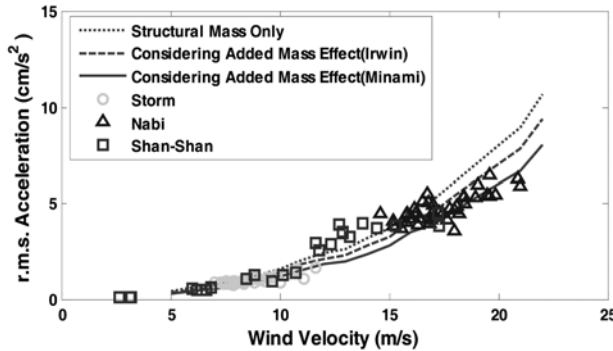
대상 고층건물 및 대공간 지붕에 대해 그림 6과 같이 풍압동시측정 풍동실험을 수행하고 풍응답을 평가하였다. 각 대상 구조물에 대한 풍동실험은 태풍 시 작용한 대표 풍향을 기준으로 수행되었다. 풍응답을 평가하기 위한 풍력의 산정은 풍압적분법을 이용해 이루어졌으며, 측정된 질점별 풍력과 모드형상을 조합하여 모드별 시간이력 일반화 하중을 산정하였다. 그리고 풍압적분 수행 전에 풍압측정공과 풍압센서를 연결하는 풍압튜브의 동특성에 의한 풍압신호의 왜곡현상을 보정하였다. 시간이력 일반화 하중을 이용하여 모드별 동적시간이력 해석을 수행하였으며, 모드별 응답을 중첩하여 풍응답을 평가하였다. 태풍발생 시 예측

된 풍응답과 비교하기 위하여 태풍 시 구조물에 작용한 풍속범위에서 풍속을 일정한격으로 변경하면서 시간이력해석을 수행하였다. 그리고 시간이력으로 예측 및 해석된 결과로부터 10분의 평가시간에 대한 가속도 기대값을 각각 산정하여 비교하였다.

먼저, 초고층 건물의 시간이력해석의 결과는 그림 7(a)와 같다. 동적 시간이력해석 시 사용된 감쇠비로는 예측을 통해 구한 값이 적용되었으며, 감쇠비의 진폭의존성을 해석 시 반영하였다. 그리고 시간이력해석 전에 동적해석에 필요한 모드형상 및 고유진동수를 정확히 구하기 위해 FE model calibration²⁾을 수행하였다. 일반적으로 구조설계 시 사용되는 FE 모델 해석결과는 특히 RC건물의 경우 실제와 상당한 차이를 나타낸다. 따라서 예측된 동적특성(고유진동수, 모드형상)을 기준으로 FE 모델을 보정하여 실제 거동과 거의 동일한 결과를 나타내는 FE 모델을 수정하고, 이를 이용해 산정된 고유진동수 및 모드형상을 풍응답해석에 적용하였다. 그림 7(a)에서와 같이 FE 모델 보정 후의 결과는 실측결과와 매우 일치하는 경향을 보이고 있으며,



(a) 초고층 건물 (최상층 가속도)



(b) 대공간 지붕 (중앙부 끝단 가속도)

그림 7 풍압적분을 이용한 풍응답 예측결과와 계측결과와의 비교

보정 전의 FE 모델 결과는 실제 측정된 결과보다 다소 보수적인 결과를 나타내고 있다. 이러한 원인은 사용성 범위 내에서의 비구조벽 강성, 품질관리에 의한 콘크리트 탄성 계수의 증가 등이 일반적인 FE 모델에서는 반영되지 않아 건물의 강성이 저평가 되었기 때문이다.

그리고 그림 7(b)는 대공간 지붕에 대한 비교결과를 나타내고 있는데, 여기에서 Added Mass Effect에 대한 고려 유무에 따라 해석결과를 구분하여 비교하였다. 대공간 지붕 구조물의 경우 지붕 상부의 일정높이 이내의 공기는 구조물에 부가적인 질량처럼 작용하여 구조물의 풍응답에 영향을 주게 된다³⁾. 따라서 그림 7(b)와 같이 시간이력해석 시 구조질량만을 반영하여 응답을 해석한 경우에는 실제 계측된 결과와 비교하여 다소 보수적인 결과를 보이게 된다. 그러나 Added Mass Effect를 고려하면 해석결과가 실제 계측된 결과와 보다 가까워지는 것을 알 수 있다.

이상의 비교결과에서 구조해석 모델의 오차, 기타 해석상의 조건 등을 정확히 반영한 해석결과를 보면 풍압적분을 이용하여 실제 계측결과와 유사한 풍응답을 적절하게 산정할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 실시간 풍압데이터의 동시측정, 풍압공의 적절한 배치, 풍압데이터의 풍압 튜브 동특성 보정이 정확히 이루어질 경우 복잡한 형태의 구조물 풍응답도 풍압적분의 기법을 활용하여 적절하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 맺음말

본 기사에서는 풍압 동시측정 풍동실험 및 풍압적분법을 이용한 풍응답의 산정법과 그 결과의 검증을 위해 태풍 시 실측된 풍응답을 비교한 결과를 소개하였다. 앞에서 기술한 바와 같이 풍압적분법을 이용하여 초대형 구조물에 대한 풍응답 예측이 적절하게 수행될 수 있으며, 복잡한 형상의 구조물에 대해서도 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 풍압적분법의 경우 풍압공 배치의 적정성이 확보되어야 하므로 향후에도 풍압공 배치에 따른 풍력측정의 정확성과 실제 풍응답 계측을 통한 비교검증이 지속적으로 수행되어야 평가결과의 신뢰성이 향상되어질 수 있을 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Ji Young Kim et. al. (2005), A comparison of effective wind loads and wind-induced responses according to pressure measuring locations on test models, Proceedings of EACWE2005, Prague.
2. Ji Young Kim, et. al (2009), "Calibration of analytical models to assess wind-induced acceleration responses of tall buildings in serviceability level", Engineering Structures, 31(9), pp.2086~2096.
3. J. Y. Kim, et. al. (2011), "Long-term Monitoring of wind-induced responses of a large-span roof structure", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 99, pp. 955~963 