

건물일체형 풍력발전기의 진동저감 기법 연구

A Study on Vibration Isolation Technique of Building-augmented Wind Turbine

이 종 원†·문 석 준*
Jong Won Lee and Seok-jun Moon

(Received November 25, 2014 ; Revised January 27, 2015 ; Accepted March 6, 2015)

Key Words : Vibration Isolation(진동저감), Wind Turbine(풍력발전기), Building-augmented(건물일체형)

ABSTRACT

Vibration issue of a building structure due to a wind turbine should be resolved for the application of building-augmented wind turbine. In this study, a dynamic analysis for an horizontal-axis up-wind wind turbine is carried out to calculate vibration excited to an example building structure. Characteristics of vertical vibration transfer of the building structure are analytically studied and compared with a criteria. Then, a method to isolate the vibration is presented by analyzing the vibration characteristics of the wind turbine, and verified by applying to the building structure.

1. 서 론

건물일체형 풍력발전기(building-augmented wind turbine)는 높은 위치에서 지상보다 월등한 풍력자원을 이용하기 위하여 풍력발전기를 건물 외벽 또는 옥상에 설치하여 전력을 생산하는 것이다⁽¹⁾. 그린빌딩을 위한 신재생에너지 중 경제성이 뛰어나고 기술적 장점이 있는 풍력발전을 적극적으로 도입할 필요가 있으며, 건물의 고층화 추세에 따라 고층건물에서의 우수한 풍력자원을 이용하여 풍력발전기의 발전효율을 향상시킬 수 있다.

WEB(wind energy for the built-environment) 연구과제는 영국, 네덜란드, 독일의 4개 연구기관에서 구조공학, 건축설계, 공력학, 환경공학 연구자들이 공동으로 수행한 프로젝트로서, 건물일체형 풍력발

전기의 실용성을 극대화함을 목적으로 하였다. 여기서는 건물일체형 풍력발전기 개발 시 빌딩구조물의 보강, 풍력발전기 서스펜션, 풍력발전기 사고로 인한 안전, 풍력발전기 진동 등의 구조적 문제점을 도출하였다⁽²⁾. 또한, 건물일체형 풍력발전기 적용을 위하여 해결되어야 할 기술적 과제로써 풍향조건, 풍력발전기 소음·진동, 통합설계, 설치, 유지관리 등의 문제를 제안하였고, 특히 풍력발전기 진동문제는 면진장치를 적용함으로써 해결할 수 있는 것으로 제시되었다⁽³⁾.

한편, 풍력발전기 설치 위치에 따른 건물의 정적구조응답을 해석적으로 고찰하기 위한 연구 및 풍력발전기 진동에 의한 건물과의 공진문제를 검토하기 위한 연구가 수행되었으며⁽⁴⁾, 건물일체형 풍력발전기에 의해 발생하는 건물진동의 전달특성을 평가하고 이를 진동 허용기준치와 비교한 연구가 진행되었

† Corresponding Author ; Member, Namseoul University
E-mail : jwlee@nsu.ac.kr
Tel : +82-41-580-2761, Fax : +82-41-580-2929
* Member, Korea Institute of Machinery and Materials

‡ Recommended by Editor Hyung Jo Jung
© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

다⁵⁾. 여기서 적용된 풍력발전기에 의한 건물진동에서, 특히 수직방향 진동이 인체진동의 관점에서 허용기준치를 초과하는 것으로 분석되었다.

한편, 이 연구에서는 건물로 전달되는 풍력발전기의 진동을 저감하기 위한 연구를 수행하는데, 외부로부터 건물로 전달되는 진동을 저감하기 위한 연구는 적용분야에 따라 다양하게 진행되고 있다. 즉, 건물의 설비장치에 대한 효과적인 진동저감을 위하여 건물바닥의 모빌리티를 고려한 파워전달기법을 적용하고, 점성감쇠가 면진장치에 대한 파워전달물에 미치는 영향을 분석하였고⁶⁾, 복수의 설비장치가 건물의 동일 층에 설치되어있는 경우, 면진장치의 정확한 거동 예측을 위하여 장치들 간의 상호작용 해석방법을 제안하였다⁷⁾. 또한, 지진에 대한 건물의 안전성을 확보하기 위하여 IRB(isolation roller bearing) 기술을 적용하고, IRB의 핵심 부품인 롤러를 건물 면진용으로 적합하게 설계하기 위하여 실험 연구가 수행되었으며⁸⁾, 건물의 이상진동 원인으로 규명된 집단리듬운동에 의한 건물 전체의 수직진동 특성을 조사하고, 이를 제어하기 위한 동조 질량감쇠기의 설계 및 성능시험을 수행한 후 거주성능의 개선정도를 평가하였다⁹⁾. 한편, 건물에 설치되지는 않지만 풍력발전기 자체의 진동을 저감하기 위한 연구도 진행되었다. 즉, 바람하중과 지진하중을 받는 풍력발전기의 나셀 하부 타워 부분에 면진장치를 설치하여 풍력발전기 구조물의 진동을 저감하기 위한 연구가 수행되었으며¹⁰⁾, 나셀 내부에 수동 동조질량감쇠기를 적용하여 해상풍력발전기의 구조물 진동을 흡수하고 소산시키기 위한 연구가 진행되었다¹¹⁾.

앞서 언급되었듯이 풍력발전기 진동문제는 건물일체형 풍력발전기 적용을 위하여 해결되어야 할 중요한 기술적 과제이지만, 이를 해결하기 위한 구체적인 연구는 저자들이 조사한 바로는 국내외적으로 아직 수행되지 않은 것으로 판단된다. 이 연구에서는 건물일체형 풍력발전기의 적용을 위하여 풍력발전기 진동에 의한 건물진동에 대한 연구를 수행한다. 선행연구⁵⁾에서 50 kW급 풍력발전기의 진동하중을 예제건물에 가진한 후 건물의 진동을 평가한 결과, 수평진동은 진동 허용기준치를 만족하였으나 수직진동은 기준치를 초과하였다. 따라서 이 연구에서는 풍력발전기 진동하중과 건물의 수직진동 전달특성을 분석한 후, 수직진동 저감을 위하여 면진장치를

설계하고 이를 예제건물에 적용하여 효과를 검증한다.

2. 풍력발전기의 진동하중

풍력발전기에서 발생하는 진동하중을 산정하기 위하여 FAST 프로그램¹²⁾을 이용하여 풍력발전기에 대한 동력학해석을 수행하였는데, 이 과정에 대한 상세한 설명은 선행연구⁵⁾를 참조할 수 있다. 건물일체형 풍력발전기로 적용할 풍력발전기의 응답을 파악하기 위하여, Table 1에 나타낸 제원을 가진 50 kW 용량의 수평축 업윈드 풍력발전기에 대하여 동력학해석을 수행하였으며, 이때 대상 풍력발전기에 적용할 바람을 생성하기 위하여 TurbSim 프로그램¹³⁾을 이용하였다. 10분간의 바람데이터를 생성하여 해석을 수행하였으며 평균풍속은 해당 풍력발전기의 정격풍속(rated wind speed)인 12 m/s로 설정하였다. 한편, 동력학해석의 결과는 0.05초 간격으로 즉, 20 Hz로 취득하였다. 한편, Fig. 1에는 풍력발전기에 대한 동력학해석을 위하여 생성된 바람의 시간이력을

Table 1 Specification of the wind turbine

Rating	50 kW
Rotor orientation	Upwind
No. of blade	3
Rotor diameter	15 m
Tower height	24.4 m
Rated wind speed	12.0 m/s
Cut-in win speed	4.9 m/s
Cut-out wind speed	22.3 m/s
Rotor mass	680 kg
Nacelle mass	1747 kg
Tower mass	3216 kg

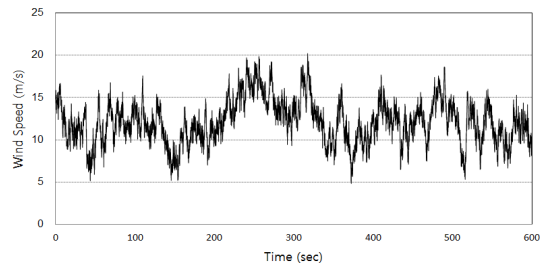


Fig. 1 Time history of the simulated wind speed

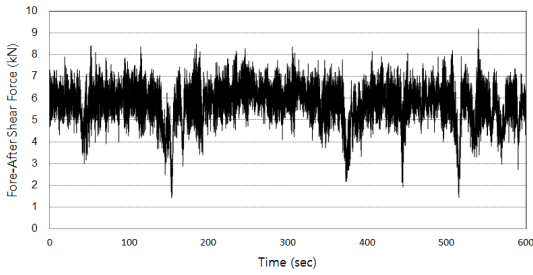


Fig. 2 Shear force(windward)

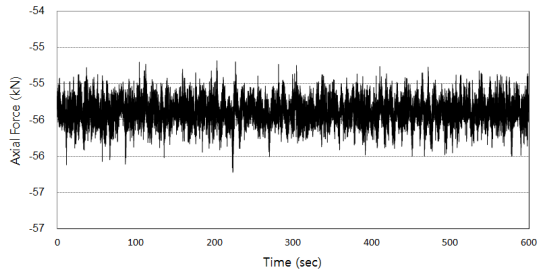


Fig. 6 Axial force

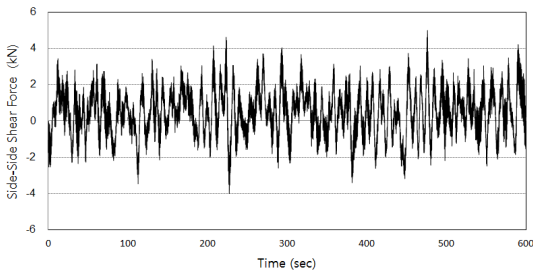


Fig. 3 Shear force(transverse of windward)

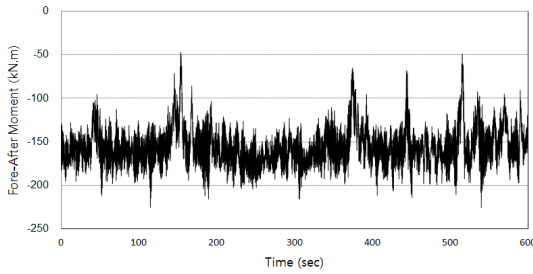


Fig. 4 Moment(windward)

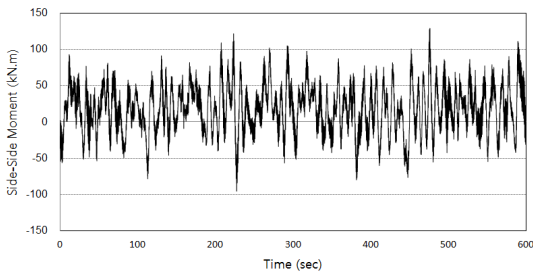


Fig. 5 Moment(transverse of windward)

초부를 고정된 플랫폼으로 처리하였다. 동력학해석을 통하여 구한 타워 최하단부의 바람 방향, 바람 횡방향의 전단력 및 모멘트와 타워 축방향력을 Figs. 2~6에 나타내었으며, 이들을 풍력발전기가 설치되는 건물 위치에 가진하였다.

3. 예제건물의 수직진동 전달특성

건물 옥상에 풍력발전기가 부착된 경우로 가정하여, Fig. 7과 같은 예제건물을 대상으로 MIDAS Gen 프로그램(MIDAS Information Technology Co., Ltd.)을 이용하여 시간이력 진동해석을 수행하였다. 예제건물은 30층(151 m)의 업무용 철골구조로서, 중간모멘트 골조와 철골 특수중심가새로 이루어진 이중골조시스템이며, 건축구조기준(KBC2009)을 만족하도록 설계하였다. 예제건물의 전력 수용률을 0.6, 부등률을 1.3, 부하율을 0.3으로 가정하면 평균 사용전력은 약 390 kW로 계산할 수 있다. 즉, 50 kW급 풍력발전기를 설치한다면 예제건물의 경우 약 13%의 전력 수요를 분담할 수 있을 것으로 판단된다.

앞에서도 언급된 바와 같이, 선행연구⁽⁵⁾에서 Fig. 7과 동일한 예제건물에 대하여 50 kW급 풍력발전기 진동하중을 가진하여 건물진동을 평가한 후, 건물진동 및 인체진동의 관점에서 진동 허용기준치와 비교한 결과, 인체진동의 관점에서 수직진동만이 기준치를 초과하였고, 나머지는 모두 기준치를 만족하였다. 이에 대한 자세한 과정은 선행연구⁽⁵⁾를 참조할 수 있으며, 여기서는 이 논문의 이해를 돕기 위하여 간단히 요약하면 다음과 같다. 즉, Fig. 8의 건물 옥상 평면에서 점선으로 표시한 절점에 대하여, Figs. 2~6에 나타난 풍력발전기 운전 중 타워 최하단부에 작

나타내었다.

건물의 옥상에 풍력발전기가 설치되는 경우로 해석을 진행하였는데, FAST 프로그램에서 타워의 기

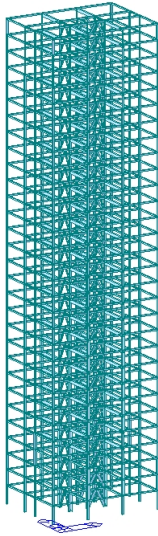


Fig. 7 Modeling of the example building

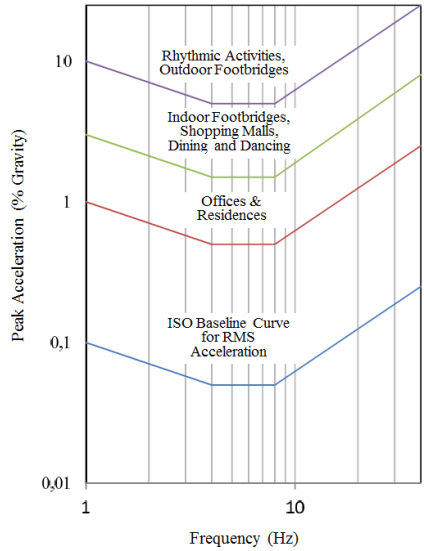


Fig. 9 Recommended peak acceleration⁽¹⁴⁾

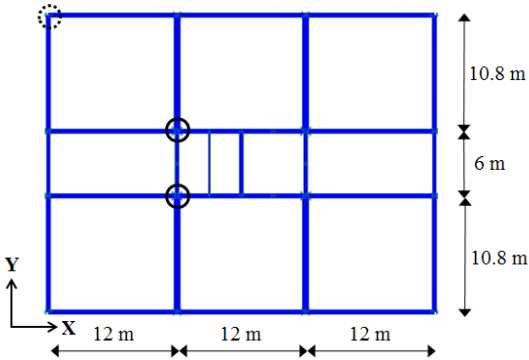


Fig. 8 Plan of the example building

Table 2 Accelerations for each loading component (Unit: % Gravity)

	F_x	F_y	F_z	M_x	M_y
RMS	0.00991	0.0196	0.129	0.571	0.0334
Peak	0.0449	0.0759	0.423	1.884	0.148

용하는 바람 방향, 바람 횡방향의 전단력 및 모멘트와 타워 축방향력을 가진하였는데 이때, 풍력발전기에 작용하는 바람의 방향을 Fig. 8의 건물 평면에서 y축 양의 방향 즉 세로 상향으로 가정하였다. 풍력발전기 진동이 가장 크게 전달되는 위치는 30층 바닥판 중 옥상층의 풍력발전기 가진 절점에서 가장 근접한 절점으로 분석되었으며, 여기서 수직방향 최대가속도(절대값)의 크기가 약 1.64 % Gravity로 추정되어 Fig. 9의 인체진동 관점에서의 최대 가속도 허용기준치를 초과하였다.

이 연구에서는 Figs. 2~6에 나타난 풍력발전기 진동하중의 각 성분들이 건물의 수직진동에 미치는 영향을 분석하였다. 즉, 5개의 성분을 동일 위치에 개

별적으로 가진한 후, 풍력발전기 진동이 가장 크게 전달되는 동일 위치에서의 가속도 응답에 대한 실효치(RMS)와 최대치를 Table 2에 정리하였다. 여기서 F_x 는 바람 횡방향 전단력, F_y 는 바람 방향 전단력, F_z 는 축방향력, M_x 는 바람 방향 모멘트, M_y 는 바람 횡방향 모멘트이다. 이로 부터, 건물의 수직진동 응답에 가장 많은 영향을 미치는 풍력발전기의 진동 하중 성분은 바람방향 모멘트인 것을 알 수 있다.

4. 면진장치 설계

3장에서 옥상층 기둥의 한 절점에 풍력발전기 진동하중을 가진한 결과, 건물의 수직진동 응답이 기준치를 초과하였다. Fig. 8의 실선으로 표시한 내부 기둥 두 절점에서 서스펜션을 통하여 풍력발전기 진동하중을 분산시켜 가진한다면 건물로 전달되는 수직진동이 저감될 것으로 판단되어 이에 대한 해석을 수행하였다. 그러나 이 경우에도 건물의 수직진동

응답이 기준치를 초과하였으며, 이에 대한 구체적 결과는 5장에서 면진장치 적용 결과와 함께 나타낸다. 따라서, 건물로 전달되는 풍력발전기의 진동을 저감하기 위하여 면진장치를 적용할 필요가 있는 것으로 판단된다.

건물 수직진동에 가장 많은 영향을 미치는 풍력발전기 타워 최하단부에 발생하는 바람방향 모멘트 진동을 저감하기 위하여 Fig. 10과 같이 서스펜션을 도입하였다. 즉, 풍력발전기를 서스펜션과 연결하여 Fig. 8의 실선으로 표시한 내부기둥 두 절점 부분에서 모멘트 진동을 수직진동으로 변환하고, 서스펜션과 기둥을 수직 면진장치로 연결하여 진동을 저감하고자 한다. 이때 서스펜션은 H-458×417×30×50 (SM 490)으로 설정하였다.

면진장치를 설계하고 검증하기 위하여, Fig. 10의 두 개의 동일한 면진장치 중 하나의 면진장치에 대한 1-자유도 모델링을 Fig. 11과 같이 나타낼 수 있으며, 운동방정식은 다음과 같다. 여기서 면진장치와 연결되는 건물 기둥 상부를 고정단으로 가정하였다.

$$m_{WT}\ddot{z} + c_i\dot{z} + k_i z = F \quad (1)$$

여기서, m , c , k 및 F 는 각각 질량, 감쇠, 강성 및 외력을 나타내며, 아래 첨자 WT 및 i 는 각각 서스펜션을 포함한 풍력발전기 및 면진장치를 표현하고 있다.

면진장치를 설계하기 위하여 풍력발전기 진동하중에 대한 주파수 분석을 수행하였다. 우선, Fig. 10의 풍력발전기 타워 최하단부에 Fig. 4에 나타낸 바람방향 모멘트를 가진하여 구한 면진장치 상부 서스펜션의 수직방향 진동하중(F)의 시간이력과 푸리에 변환 결과를 Fig. 12(a) 및 Fig. 13(a)에 각각 나타내었다. 주파수 분석결과를 살펴보면, 약 1.6 Hz와 3.2 Hz에서 진동이 많이 발생하는데, 이는 이 연구에서 적용된 풍력발전기의 바람방향 1차 고유주파수 1.65 Hz와⁽⁴⁾ 블레이드 회전주파수(3p) 3.21 Hz에 해당되는 것으로 판단된다. 즉, 적용된 풍력발전기의 로터 속도는 고정 형식이며, 고정 로터속도는 64.14 rpm이다. 따라서, 풍력발전기 블레이드의 회전주파수는 블레이드가 3개이므로 3.21 Hz(3p)이다.

면진장치 고유주파수의 $\sqrt{2}$ 배 이상의 주파수 대역에서 면진이 가능하므로⁽⁶⁾, 풍력발전기의 1차 고유주파수 1.65 Hz 이상에서 진동을 저감하기 위하여

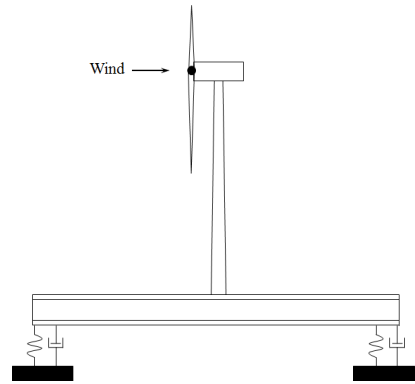


Fig. 10 The suspension and isolator

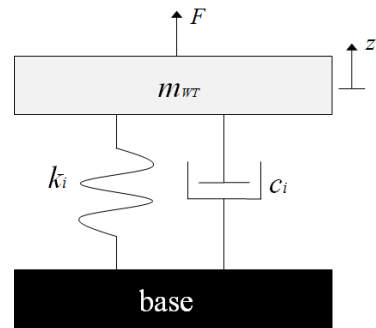
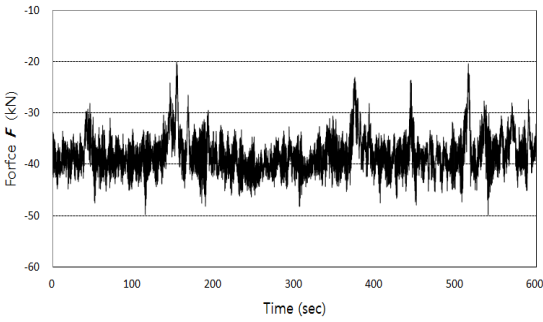


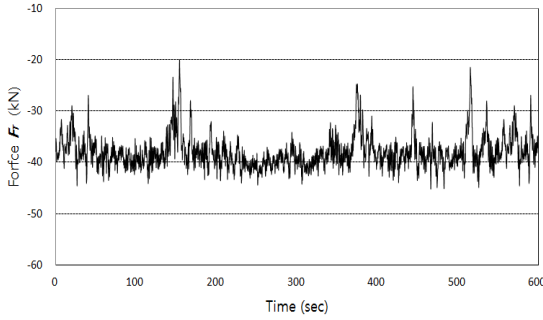
Fig. 11 Schematic modeling for the 1-DOF system

면진장치의 고유주파수를 1 Hz로 설정하였다. 한편, Fig. 10의 풍력발전기와 서스펜션의 전체 무게는 8,133 kg이며, 따라서 Fig. 11의 1-자유도 면진장치 상부에 설치된 무게(m_{WT})는 4,067 kg이다. 따라서 강성계수(k_i)를 160,539 N/m로 설정하여 고유주파수를 1 Hz 하였고, 감쇠비를 0.05로 가정하여 감쇠계수(c_i)를 3,613 N/(m/s)로 설정하였다. Fig. 11에서 작용하는 수직방향 힘(F)과 면진장치를 거쳐 하부로 전달되는 힘($F_T = c_i\dot{z} + k_i z$)과의 Bode 선도는 Fig. 14와 같다. 약 1 Hz 근처에 면진장치에 의한 고유진동수가 있는 것을 알 수 있으며, 고주파수 영역에서는 전달률이 저감하는 것을 확인할 수 있다.

면진장치를 거쳐 하부로 전달되는 하중(F_T)의 시간이력과 푸리에변환 결과를 Fig. 12(b) 및 Fig. 13(b)에 각각 나타내었다. 이를 Fig. 12(a) 및 Fig. 13(a)와 비교해보면, 약 1.6 Hz와 3.2 Hz에서의 진동을 포함하여 고주파수 영역에서 효과적으로 진동이 저감될 수 있음을 확인할 수 있다.

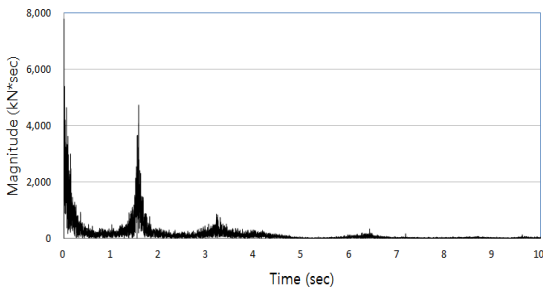


(a) F

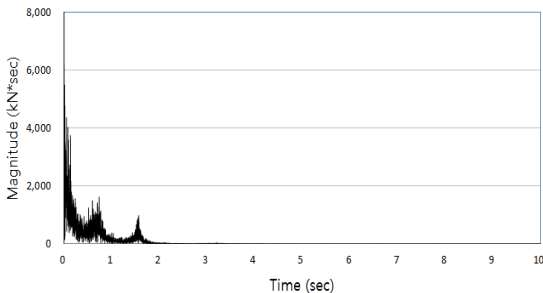


(b) F_T

Fig. 12 Force time history



(a) F



(b) F_T

Fig. 13 Fourier amplitude spectrum

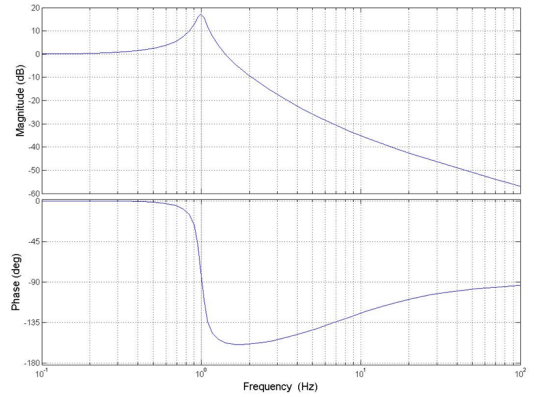


Fig. 14 Bode plot from F to F_T

5. 면진장치의 건물 적용

설계된 면진장치를 Fig. 7에 나타낸 예제건물에 해석적으로 적용하였다. 즉, Fig. 8의 실선으로 표시한 내부기둥 두 절점에 서스펜션을 통하여 풍력발전기 진동하중을 분산시켜 가진하였는데, 동일한 조건에서 면진장치의 유무에 따른 건물 수직진동 응답을 비교하였다. 면진장치를 적용한 경우 예제건물에 설치되는 풍력발전기를 Fig. 15에 나타내었는데, 타워 최하단부 절점에 Figs. 2~6에 나타낸 풍력발전기 진동하중을 가진하였다. 풍력발전기 진동하중 발생에 의하여 건물에 전달되는 진동을 해석하였는데, 건물에서 풍력발전기 진동이 가장 크게 전달되는 위치에서 발생하는 가속도 응답의 최대치를 면진장치 유무에 따라 구한 후 면진장치 적용에 따른 진동저감 효과를 확인하고 허용기준치와 각각 비교하였다. 또한, 풍력발전기 진동이 가진된 건물 기둥의 각층 바닥에 발생하는 시간이력 가속도 응답의 최대값을 면진장치 유무에 따라 구한 후, 역시 면진장치 적용에 따른 진동저감 효과를 확인하고 층수에 따른 가속도 응답의 변화를 살펴보았다. 결과에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

풍력발전기 진동이 가장 크게 전달되는 위치는 30층 바닥판 중 옥상층의 풍력발전기 가진 두 절점에서 가장 근접한 절점으로 분석되었으며, 이 절점에서 발생하는 수직진동의 가속도 시간이력을 면진장치 유무에 따라 Fig. 16에 비교하였고, 이 신호들의 푸리에변환 결과를 역시 면진장치 유무에 따라

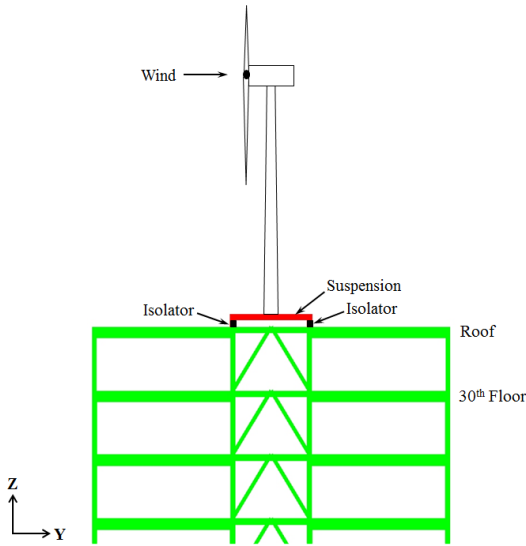
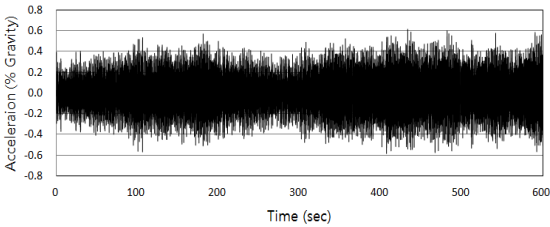
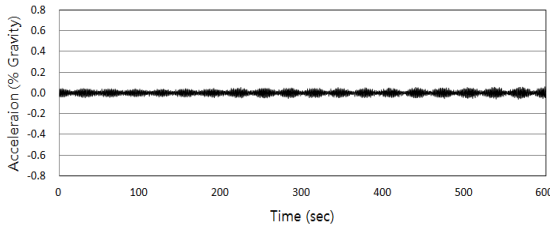


Fig. 15 Application of the wind turbine to the example building



(a) w/o isolation

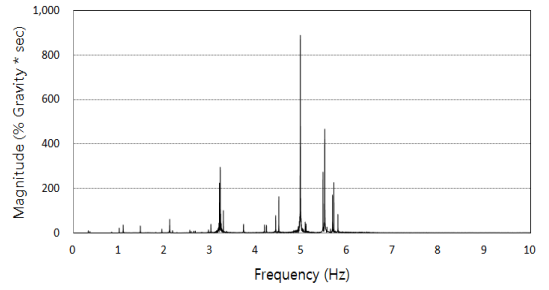


(b) w/ isolation

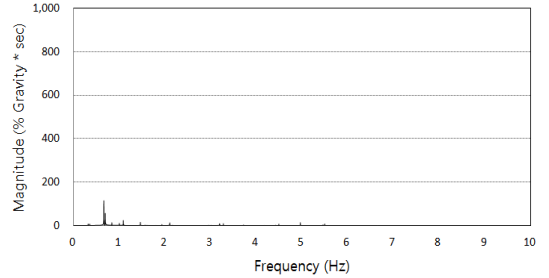
Fig. 16 Acceleration time history

Fig. 17에 비교하였다. 또한, Fig. 18에는 풍력발전기 진동이 가진된 건물 기둥의 각층 바닥에 발생하는 시간이력 가속도 응답의 최대값(절대치)을 추출하여 그래프로 정리하였다.

면진장치가 없는 경우 수직방향 최대가속도(절대값)의 크기는 약 0.62 % Gravity로써, Fig. 9의 허용 기준치를 초과하는 과도한 진동이 발생하였다. 여기



(a) w/o isolation



(b) w/ isolation

Fig. 17 Fourier amplitude spectrum

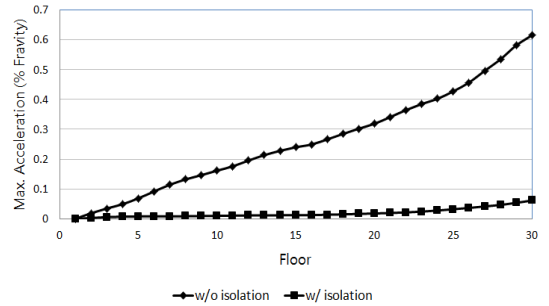


Fig. 18 Maximum acceleration by floor

서, 풍력발전기의 바람방향 1차 고유주파수는 1.65 Hz이고 블레이드의 회전주파수는 3.21 Hz이므로 Fig. 9의 허용기준치와 비교할 때 주파수 영역을 대략적으로 1 Hz에서 10 Hz 사이 구간에서 비교하였다. 그러나, 면진장치를 도입한 경우 수직방향 최대 가속도(절대값)의 크기는 약 0.062 % Gravity로써, 허용기준치를 만족하면서 효과적으로 진동이 저감됨을 알 수 있다. Fig. 17의 주파수 영역 분석에서 살펴보면 면진장치로 인해 고주파수 영역에서 진동이 저감될 수 있음을 확인할 수 있다. 한편, Fig. 18에서 면진장치 적용에 따라 각 층별 가속도 응답이 감소함을 알 수 있고, 면진장치와 관련 없이 풍력발전

기가 설치된 옥상층으로 부터 1층에 이르기까지 점차적으로 가속도응답이 감소함을 알 수 있다.

6. 결 론

건물일체형 풍력발전기를 적용하기 위해서는 풍력발전기에 의한 건물의 진동 문제를 해결해야하며, 이 연구에서는 풍력발전기 진동에 의하여 건물로 전달되는 수직진동의 전달특성을 평가하고, 진동을 저감할 수 있는 방안을 제안하였다. 즉, 풍력발전기에 대한 동력학 해석을 수행하여 건물에 발생하는 진동하중을 산정하고, 이를 예제건물에 가진하여 진동전달 특성을 분석하고 진동 허용기준치와 비교하였다. 또한, 건물의 수직진동을 저감하기 위하여 풍력발전기 진동하중 특성을 분석한 후 이에 대한 면진장치를 설계하고 이를 예제건물에 적용하여 효과를 검증하였다.

이 연구에서 적용한 예제건물에 설치되는 50 kW 급 풍력발전기에 대해서, 면진장치를 도입하여 효과적으로 수직진동을 저감할 수 있었으며 허용기준치도 만족할 수 있었다. 실제로 건물일체형 풍력발전기를 적용하기 위해서는, 대상 건물이 설계된 후 이에 적절한 풍력발전기 규모를 결정하고, 이 연구에서 제안된 방법을 이용하여 건물의 진동특성을 평가하고 진동을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

향후, 대표성을 갖는 다수의 고층건물 형식과 풍력발전기 유형별 변수를 기반으로 건물의 진동특성 및 진동저감기법을 연구하여 더욱 일반적인 결론을 도출할 계획이다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No. NRF-2012R1A1A4A01005928).

References

(1) Roy, D., Brad C., David, B. and Graeme, W., 2008, Harvesting Wind Power from Tall Buildings, CTBUH 8th World Congress.
 (2) Campbell, N., Stankovic, S., Graham, M., Parkin,

P., Duijvendijk, M., Gruiter, T., Behling, S., Hieber, J., and Blanch, M., 2001, Wind Energy for the Built Environment(Project WEB), Procs. European Wind Energy Conference & Exhibition, Copenhagen.

(3) Dutton, A. G., Halliday, J. A., Blanch, M. J., 2005, The Feasibility of Building-mounted/Integrated Wind Turbines(BUWTs), Final Report, Energy Research Unit, CCLRC.

(4) Lee, J. W., 2013, A Study on Structural Effects of Building-augmented Wind Turbine on Building, Transactions of the Architectural Institute of Korea, Vol. 29, pp. 3~10.

(5) Lee, J. W., 2013, A Study on Vibration Characteristics of Building Structure Excited by Building-augmented Wind Turbine, Journal of the Construction and Environment Research Institute, Vol. 8, pp. 26~35.

(6) Tao, J. and Mak, C. M., 2006, Effect of Viscous Damping on Power Transmissibility for the Vibration Isolation of Building Services Equipment, Applied Acoustics, Vol. 67, pp. 733~742.

(7) Mak, C. M. and Yun, Y., 2010, A Study of Power Transmissibility for the Vibration Isolation of Coherent Vibratory Machines on the Floor of a Building, Applied Acoustics, Vol. 71, pp. 368~372.

(8) Park, Y. G., Ha, S. H., Seong, M. S., Jeon, J. C. and Choi, S. B., 2013, Roller Design of IRB Seismic Isolation Device Using Testing Evaluation : Part I. Geometry Dimension and Crowning, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 23, pp. 185~191.

(9) Joo, S. R., Ryu, K. C. and Lee, S. K., 2014, Application of Tuned Mass Damper for the Reduction of Global Vertical Vibration of Building due to Rhythmic Group Activities, Journal of the Wind Engineering Institute of Korea, Vol. 18, pp. 111~118.

(10) Woude, C. V. and Narasimhan, S., 2014, A Study on Vibration Isolation for Wind Turbine Structures, Engineering Structures, Vol. 60, pp. 223~234.

(11) Stewart, G. M. and Lackner, M. A., 2014, The Impact of Passive Tuned Mass Dampers and Wind-wave Misalignment on Offshore Wind Turbine Loads, Engineering Structures, Vol. 73, pp. 54~61.

(12) Jonkman, J. M. and Buhl Jr., M. L., 2005,

FAST User's Guide, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/EL-500-38230.

(13) Jonkman, B. J., 2009, TurbSim User's Guide: Version 1.50, National Renewable Energy Laboratory Technical Report, NREL/TP-500-46198.

(14) Gandomkar, F. A., Badaruzzaman, F. A. and Osman, S. A., 2012, Dynamic Response of Low Frequency Profiled Steel Sheet Dry Board with Concrete Infill(PSSDBC) Floor System Under Human Walking Load, Latin American Journal of Solids and Structures, Vol. 9, p. 22.



Jong Won Lee received his Ph.D. from the Civil and Environmental Engineering Department at Korea Advanced Institute of Science and Technology in 2003. He worked at Korea Institute of Machinery and Materials. His research interests include structural health monitoring, damage identification, and smart sensor technique.