

3MW 풍력터빈 블레이드의 공탄성 안정성 해석

김경택^{1)*} · 주완돈²⁾ · 이상일³⁾ · 이정훈⁴⁾

Aeroelastic Stability Analysis of a 3-MW Wind Turbine Blade

Kyung-Taek Kim^{1)*} · Wan-Don Joo²⁾ · Sang-Il Lee³⁾ · Jeong-Hoon Lee⁴⁾

Received 23 December 2014 Revised 7 April 2015 Accepted 7 April 2015

ABSTRACT This paper deals with a numerical investigation on aeroelastic stability characteristics of a 3-MW wind turbine blade. Utilizing a commercial software, a linear aeroelastic model for the blade stability analysis is constructed based on both the blade element momentum (BEM) theory and formulations for flexible multi-body system dynamics. Conventional linear stability analysis, which is suitable for the early stages of blade design, is then carried out by calculating complex eigenvalues of the analysis model taking normal and abnormal operating conditions into account. The results demonstrate that the blade maintains the stability during standard normal operation, and also emphasize the necessity of considering potential abnormal operating events, such as those caused by control system faults, for blade aeroelastic stability analysis.

Key words Wind Turbine(풍력터빈), Blade(블레이드), Aeroelastic Stability(공탄성 안정성)

Nomenclature

- λ : complex eigenvalue
 ζ : modal damping ratio
 ω_n : undamped natural frequency, rad/s
 ω_d : damped natural frequency, rad/s

1. 서론

풍력터빈의 대형화 추세가 이어져 오는 가운데 블레이드의 공탄성 불안정 현상의 위험성은 꾸준히 제기되어 왔다. 이는 경량화와 공력성능 향상에 주안점을 두고 형상 및 구조 설계가 이루어지는 대형 블레이드의 경우, 공기역학적 감쇠 특성 향상에는 한계가 있는 반면 굽힘-비틀림 진동모드의 연성강도가 상대적으로 높아 공탄성 안정성이 크게 저하될 가능성이 있기 때문이다.¹⁻³⁾ 물론 지금까지 대형 풍력터빈 블레이드에서 공탄성 불안정 현상 발현에 기인한 치명적 손상 사례가 아직까지 보고된 바는 없다. 하지만 블레이드에 충분한 안정성 여유(stability margin)가 보장되지 않은 경우 피로수명이 현저히 단축될 수 있는 만큼, 오늘날 대형 블레이드 설계에서도 공탄성 안정성 평가의 중요성을 간과할 수 없으며 향후에는 그 중요성이 더욱 강조될 것으로 예상된다.

-
- 1) 두산중공업 풍력기술개발팀 E-mail: kyungtaek.kim@doosan.com
Tel: +82-31-326-2386 Fax: +82-31-326-2398
- 2) 두산중공업 풍력기술개발팀 E-mail: wandon.joo@doosan.com
Tel: +82-31-326-2387 Fax: +82-31-326-2398
- 3) 두산중공업 풍력기술개발팀 E-mail: sang-il.lee@doosan.com
Tel: +82-31-326-2381 Fax: +82-31-326-2398
- 4) 두산중공업 풍력기술개발팀 E-mail: jehoo.lee@doosan.com
Tel: +82-31-326-2360 Fax: +82-31-326-2398

이러한 관점에서, 두산중공업은 블레이드 설계단계에서 공탄성 안정성 해석 및 평가를 수행함으로써 블레이드의 구조적 신뢰성 향상을 도모하고 있으며, 이 논문에서는 3MW 급 풍력터빈 블레이드의 초기 설계단계에서 공탄성 안정성 해석을 수행한 사례를 소개하도록 한다.

2. 공탄성 안정성 해석

블레이드 공탄성 안정성 해석은 리아푸노브 선형화법(Lyapunov's linearization method)을 기반으로 이루어지며⁴⁾, 해석 결과로부터 특정 동작점에서 블레이드의 국부 안정성(local stability)을 평가한다. 즉, 다양한 풍속 및 터빈 운전조건에서 회전하는 블레이드의 선형 공탄성 모형을 수립하고 복소고유치를 산출하여, 고유치 실수부의 부호 및 크기를 확인함으로써 계의 동적 안정성을 평가할 수 있다.

선형화된 블레이드 공탄성 모형의 임의 복소고유치를 다음과 같이 표현하면

$$\lambda = \zeta\omega_n \pm j\omega_d \tag{1}$$

여기서 ζ 는 모드감쇠비를 나타내고 ω_n 과 ω_d 는 비감쇠 및 감쇠 고유진동수를 각각 의미한다. 주어진 초기변위 u_0 및 초기속도 v_0 에 대한 해당 진동모드의 자유응답은 다음 식으로 주어진다.

$$u(t) = e^{-\zeta\omega_n t} \left(u_0 \cos\omega_d t + \frac{v_0 + u_0\zeta\omega_n}{\omega_d} \sin\omega_d t \right) \tag{2}$$

위 식에서 자유응답의 감쇠율을 의미하는 복소 고유치의 실수부(혹은 모드감쇠비)가 음의 값을 가지는 경우, 블레이드는 해당 자유응답이 선형해석 범위에서 지속적으로 증가하는 불안정한 거동을 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 또한, 자유응답 감쇠율이 양의 값을 갖더라도 그 크기가 상당히 작은 경우에는 과도한 피로 손상이 발생할 수 있음을 자명하다.

2.1 블레이드 공탄성 모형

공탄성 안정성 해석 대상인 두산중공업의 3MW 풍력터

빈 블레이드 DSB48.3은 국내 서해권에 적합한 저풍속 풍황조건(IEC Wind Class IIA)을 고려하여 개발되었으며⁵⁾ 블레이드의 외형 및 제원을 Fig. 1과 Table 1에 각각 나타내었다.

해석의 효율성과 정확성 측면에서 실용적인 BEM(blade element momentum)이론 및 티모센코 보(Timoshenko beam)이론을 기반으로, 균일 정상풍속(uniform steady wind speed) 분포 하에 특정 피치각(pitch angle) 및 회전속도로 회전하는 조건을 고려하여 블레이드의 공탄성 모형을 수립한다. 이 해석에서는 모형 수립 및 선형화 과정에서 편이상 상용 S/W인 BLADED를 활용하였다.⁶⁾ Table 2는 해석 모형 수립 및 수치 계산과 관련된 주요 사항을 보여준다.



Fig. 1. Illustration of DSB48.3, a 3-MW wind turbine blade designed for IEC wind class IIA

Table 1. Design specification of DSB48.3

Blade length	48.3 m
Rated power (electric)	3,000 kW
Rated rotational speed	15.4 rpm
Design wind class	IEC IIA
Max. chord length	4.1 m
Blade mass	11,200 kg
Cut-in/-out wind speed	3 m/s / 25 m/s
Material	Glass fiber

Table 2. Details on the blade modeling and aeroelastic calculation

Software	BLADED Ver. 4.3
Model DOF	8
Structural damping	1%
# of blade elements	25
Wind profile	Uniform steady wind
Aerodynamics	Quasi-steady BEM theory
	Equilibrium wake model
	Prandtl tip/hub losses

2.2 해석결과: 정상 운전조건

일반적인 가변속 및 피치 제어 방식(variable rotor speed and pitch regulated)을 채용한 두산중공업 3MW 풍력터빈은 정격풍속 미만의 풍속 구간에서는 최대 출력효율 달성을 위해 최적 주속비(TSR, Tip Speed Ratio)를 유지하도록 발전기 토크제어를 수행한다. 그리고 정격 풍속 이상의 풍속 구간에서는 블레이드 피치 제어를 수행하여 로터 정격회전속도 및 발전 정격출력을 유지한다. 이러한 정상 운전조건을 만족하도록 하는 로터 회전속도 및 블레이드 피치각을 Fig. 2에 도시하였으며, 이 조건을 적용하여 각 풍속 조건에서 수립된 DSB48.3 블레이드의 선형 공탄성 모형에 대한 복소 고유치를 산출하였다.

계산된 고유치로부터 블레이드 모드주파수 및 모드감쇠를 도시하면 Fig. 3과 같다. 블레이드 피치각, 로터 회전속도 및 풍속의 변화는 블레이드 익형에 작용하는 바람의 상대 풍속 및 받음각(angle of attack)의 변동을 야기하는데, 일반적으로 모드주파수보다는 모드감쇠가 이러한 공기역학적 특성 변화에 보다 민감한 특징이 있다. 이 그림은 이러한 경향을 대체로 잘 보여준다. 그리고 Fig. 3(b)에서 음의 모드감쇠를 갖는($\zeta < 0$) 진동모드가 관찰되지 않으므로, 적어도 정상 운전조건에서 블레이드는 공탄성학적으로 안정하다고 판단할 수 있다.⁴⁾(여기서 1차 flat 방향 모드감쇠는 20% 이상의 값으로 계산되었다.)

이에 더하여, 계의 비선형 특성이 반영된 자유응답 시계열을 확인해보면 Fig. 4에 보인 바와 같이 초기교란에 의한 블레이드 자유응답이 시간이 지남에 따라 평형값으로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이는 선형 안정성 해석으로부터의 예측과 일치하는 결과로, 해당 선형 안정성 해석 결과를

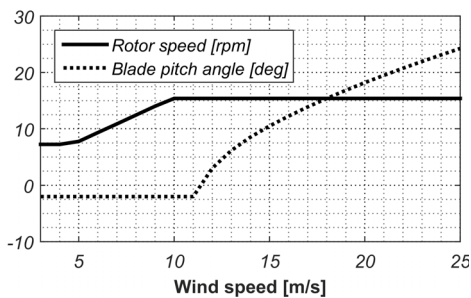
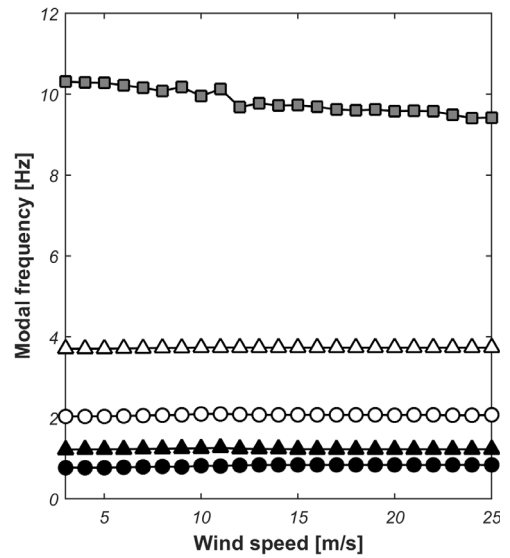


Fig. 2. A standard normal operation scenario for a 3-MW wind turbine

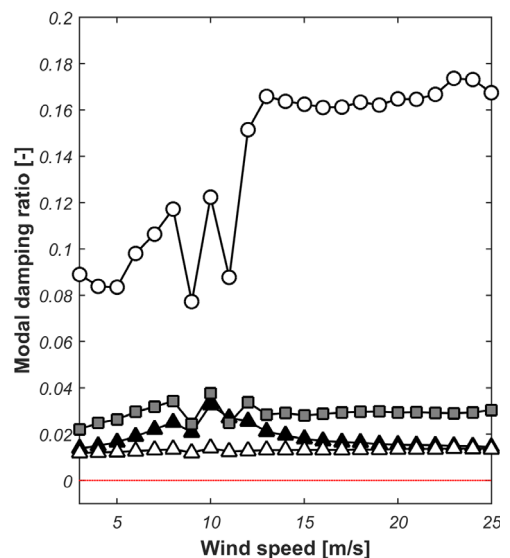
신뢰할 수 있음을 의미한다.

2.3 해석결과: 비정상 운전조건

앞 절에서는 풍력터빈의 정상 운전조건에서 DSB48.3 블레이드가 공탄성학적으로 안정하게 설계되었음을 확인하였다. 이 절에서는 터빈의 비정상적인 운전상황에서 블레이드의 공탄성 안정성을 평가하도록 한다. 그런데 풍력



(a)



(b)

Fig. 3. (a) Modal frequency and (b) damping of DSB48.3 under the normal operating condition described in Fig. 2: ●, 1st flat-wise mode; ▲, 1st edge-wise mode; ○, 2nd flat-wise mode; △, 2nd edge-wise mode; ■, 1st torsional mode

터빈의 모든 비정상 운전조건을 일반화하여 정의하기는 어려우므로, 비정상 운전상황을 가정한 운전 시나리오들을 정의하고 각 시나리오 단위로 안정성 해석을 수행하는 것이 현실적이다. 여기서는 제어시스템 오작동 등에 의해 정격풍속 이상에서 블레이드 피치제어가 적용되지 않는 가운데 최적 주속비를 유지하는 운전 시나리오를 상정하여, 비정상 운전조건에서 동작하는 블레이드에 대한 공탄성 안정성 해석의 일례를 보였다.

각 풍속에서 최적 주속비를 만족시키는 로터 회전속도를 정의하고(Fig. 5), 이 조건을 적용하여 산출한 블레이드 모드주파수 및 모드감쇠를 Fig. 6에 나타내었다. 먼저 Fig. 6(a)에서는, 로터 회전에 의한 원심 응력 증가로 블레이드 굽힘모드의 주파수가 회전속도에 대하여 점진적으로 증가하

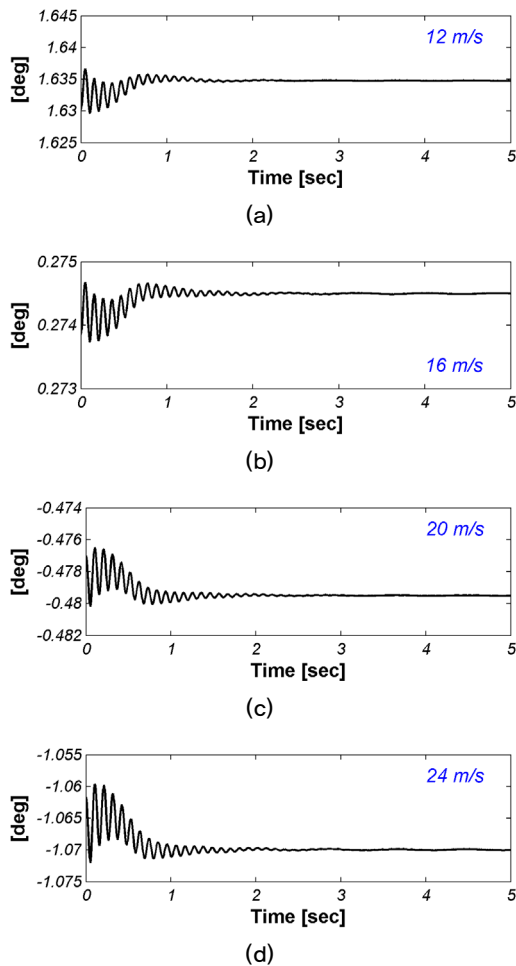


Fig. 4. Torsional free responses at the tip of DSB48.3 calculated with the control scheme for normal operation considering several wind speeds: (a) 12 m/s, (b) 16 m/s, (c) 20 m/s, (d) 24 m/s

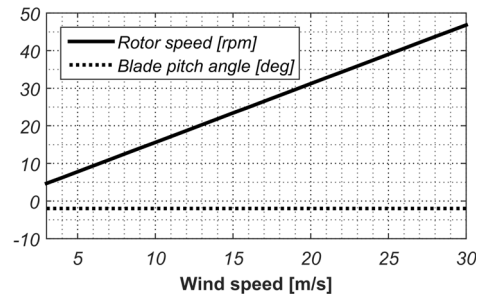


Fig. 5. An abnormal operation scenario for a 3-MW wind turbine where a constant TSR is maintained even for the above rated wind speed region

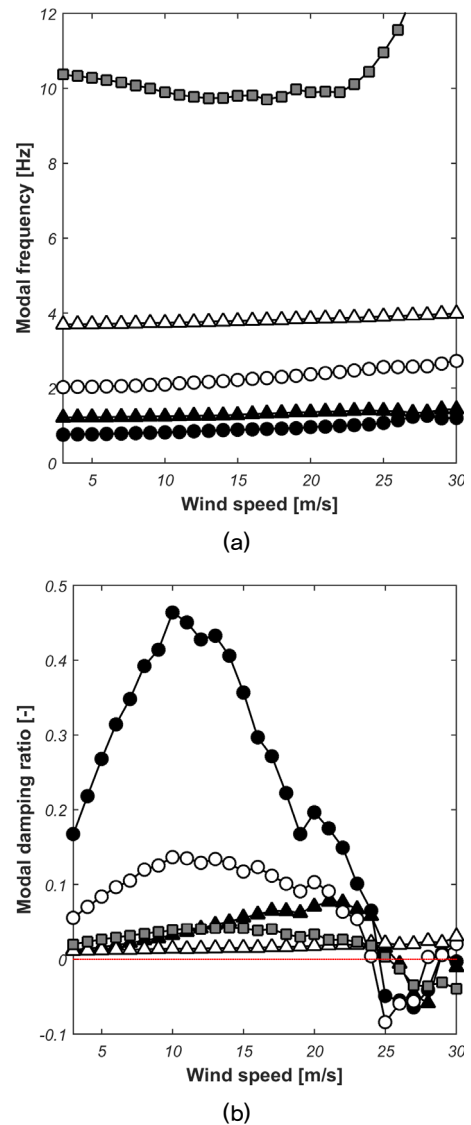


Fig. 6. Modal frequency (a) and damping (b) of DSB48.3 under the abnormal operating condition described in Fig. 5: ●, 1st flat-wise mode; ▲, 1st edge-wise mode; ○, 2nd flat-wise mode; △, 2nd edge-wise mode; ■, 1st torsional mode

는 경향을 볼 수 있고 edge 방향보다는 flat 방향의 굽힘모드 주파수의 증가가 두드러짐을 확인할 수 있다. 그리고 11m/s 풍속에서 flat 방향 굽힘모드의 감쇠가 급격히 감소하기 시작하고, 24m/s 이상의 풍속에서 다수의 진동모드가 음의 모드감쇠를 가지는 것을 Fig. 6(b)에서 볼 수 있는데 이 영역에서 블레이드의 공탄성 불안정 현상이 발생할 가능성이 높다.

공탄성 불안정 현상이 발현되는 동작환경을 보다 명확히 확인하기 위하여, 근사 선형해석으로부터 파악된 불안정 현상 발현 풍속인 24m/s 부근에서 비선형 모형에 기반한 자유응답 시계열을 산출하였고 이를 Fig. 7에 도시하였다. 불안정 현상이 24.2~24.4m/s 풍속 구간에서 발현되기 시작함을 유추할 수 있으며, 이는 Fig. 5로 표현되는 비정상

운전 상황에서는 해당 풍속 구간 이상에서의 운전을 반드시 제한할 필요가 있음을 말해준다.

3. 결론

풍력터빈의 운전조건에 따른 블레이드의 공탄성 안정성 해석 결과로부터, DSB48.3 블레이드는 정상 운전조건에서 공탄성학적으로 안정함을 확인하였다. 그리고 특수한 동작조건에서 공탄성 불안정 현상이 발현되는 일례를 통해, 의도적인 제어 동작 혹은 오작동 등에 의해 터빈의 동작상태가 정상 운전조건을 크게 벗어날 가능성이 있는 경우, 블레이드 공탄성 불안정 현상의 발현 조건 및 위험성을 적절히 평가해야 하며 필요시 불안정 동작조건 회피를 고려한 터빈 설계가 이루어져야 함을 보였다.

후 기

이 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제(No. 20133010021750)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- [1] Chaviaropoulos, P. K., 2001, "Flap/Lead-Lag Aeroelastic Stability of Wind Turbine Blades", *Wind Energ.*, 4(4), 183-200.
- [2] Riziotis, V. A., Voutsinas, S. G., 2004, "Aeroelastic Stability of Wind Turbines: the Problem, the Methods and the Issues", *Wind Energ.*, 7(4), 373-392.
- [3] Hansen, M. H., 2007, "Aeroelastic Instability Problems for Wind Turbines", *Wind Energ.*, 10(6), 551-577.
- [4] Slotine, J. E., Li, W., 1991, "3.3. Linearization and Local Stability", in: Wenzel, J. (ed.), "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, New Jersey, pp. 53-57.
- [5] 이기학, 이상일, 이상우, 오인규, 박종포, 2011, "3MW급 IEC Wind Class IIa 풍력발전시스템 개발", 한국전산유체 공학회 2011년도 춘계학술대회, pp. 236-239.
- [6] Bossanyi, E. A., 2012, *Bladed Theory Manual Version 4.3.*, GL GH & Partners Ltd.

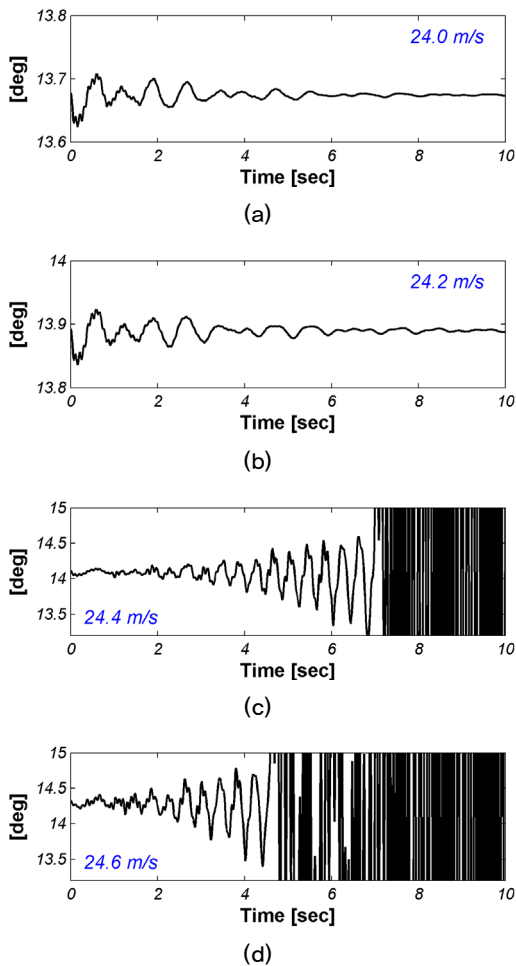


Fig. 7. Torsional free responses at the tip of DSB48.3 calculated with the control scheme for abnormal operation considering several wind speeds: (a) 24.0 m/s, (b) 24.2 m/s, (c) 24.4 m/s, (d) 24.6 m/s