

균일 흐름과 지상 전단 흐름에 놓인 수평축 풍력터빈 블레이드의 공력 하중 비교

김진¹⁾, 유기완²⁾

Aerodynamic Load Analysis for Wind Turbine Blade in Uniform Flow and Ground Shear Flow

Jin Kim, Ki-Wahn Ryu

Key words : Horizontal Axis Wind Turbine(HAWT, 수평축 풍력 터빈), Aerodynamic Load Analysis(공력 하중 해석), Uniform Flow(균일 흐름), Normal Wind Profile(정규 흐름 형상), Low-Speed Shaft(LSS, 저속 회전축)

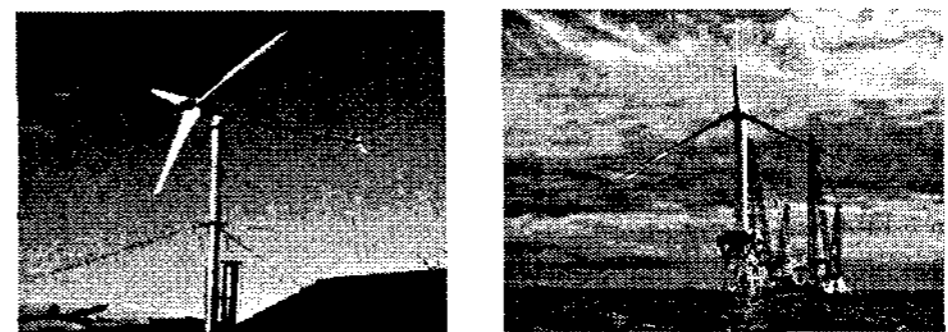
Abstract : Recently the diameter of the 5MW wind turbine reaches 126m, and the tower height is nearly the same with the wind turbine diameter. The blade will experience periodic inflow oscillation due to blade rotation inside the ground shear flow region, that is, the inflow velocity is maximum at uppermost position and minimum at lowermost position. In this study we compare the aerodynamic data between two inflow conditions, i.e, uniform flow and normal wind profile. From the computed results all of the relative errors for oscillating amplitudes increased due to the ground shear flow effect. Especially M_y at hub and F_x , M_y , M_z at LSS increased enormously. It turns out that the aerodynamic analysis including the ground shear flow effect must be considered for fatigue load analysis.

1. 서론

풍력터빈 설계 시에는 균일흐름을 가정하지만 실제 지상 또는 해상에 설치되는 풍력 터빈은 속도 경계층 안에 놓이게 되어 블레이드가 수직 상방을 지날 때와 수직 하방을 지날 때에 속도 차에 의한 주기적인 하중의 진동이 발생된다 [1, 2].

Fig. 1에서와 같이 2kW급의 소형 풍력터빈의 경우에는 지름이 3.6m에 불과해 전단 흐름 유입을 고려할 필요는 없지만, Fig. 1(b)에서 보이는 바와 같이 최근에 설치되는 5MW급 해상 풍력터빈은 전단 흐름에 의한 하중 변동이 구조물에 끼치는 영향을 간과해서는 곤란하다.

이는 직경이 126m에 이르고 타워 높이도 대략 직경 길이에 해당되어 풍력터빈 회전면에 붙어오는 최대 풍속과 최소풍속의 차이가 허브 중심 속도를 기준으로 최대 13%에 이른다. 하중의 경우에는 속도의 제곱에 비례하므로 최대 28% 정도의 하



(a) 2kW wind turbine (b) 5MW wind turbine

Fig. 1 Small and large wind turbines

중 변화를 일으킬 수 있다고 볼 수 있다. 이러한 속도 변화는 블레이드 허브에 모멘트의 주기적인 진동을 일으키며 저속 동력 전달축에 작용하는 모멘트에도 변동 진폭의 증가를 야기하는 원인으로 작용하게 된다.

IEC61400-1의 하중조건에서는 정적 극한 하중

1) 전북대학교 항공우주공학과 대학원

2) 전북대학교 항공우주공학과

E-mail : kwryu@chonbuk.ac.kr

Tel : (063)270-4286 Fax : (063)270-2472

뿐만 아니라 동적 하중 조건을 규정하고 있고 지상 경계층(ground shear flow)에 의한 하중 변동도 그 중 하나의 경우가 된다. 이러한 공력 해석을 통해 설계 수명을 만족하도록 하는 피로 해석을 수행하여 구조적 건전성을 확보하게 된다.

따라서 본 연구에서는 지상 경계층에 의한 전단 흐름이 허브와 저속 전달축(low-speed shaft, LSS)의 6분력 하중을 수치적으로 얻어내고 이를 균일 흐름장(uniform flow)에 놓았을 때의 하중 계산치와 상호 비교함으로써 지상 전단 흐름이 무시할 만한지 반드시 고려할 대상인지를 가늠하기로 한다.

2. 지상경계층 내의 정규 흐름 형상

풍력터빈은 지상에 존재하는 속도 경계층에 의해서 수직 방향으로 속도 분포가 지수함수 분포를 갖게 되는 속도 경계층 내부에 설치된다. 속도 분포는 경험적으로 다음과 같이 모델링 된다.

$$V(z) = V_{hub}(z/z_{hub})^\alpha$$

여기서 V_{hub} 는 허브 높이에서의 풍속이고 z_{hub} 는 허브 높이를 말한다. α 는 지상에서는 0.2이고 해상에서는 이보다 작은 0.1에 이른다 [3].

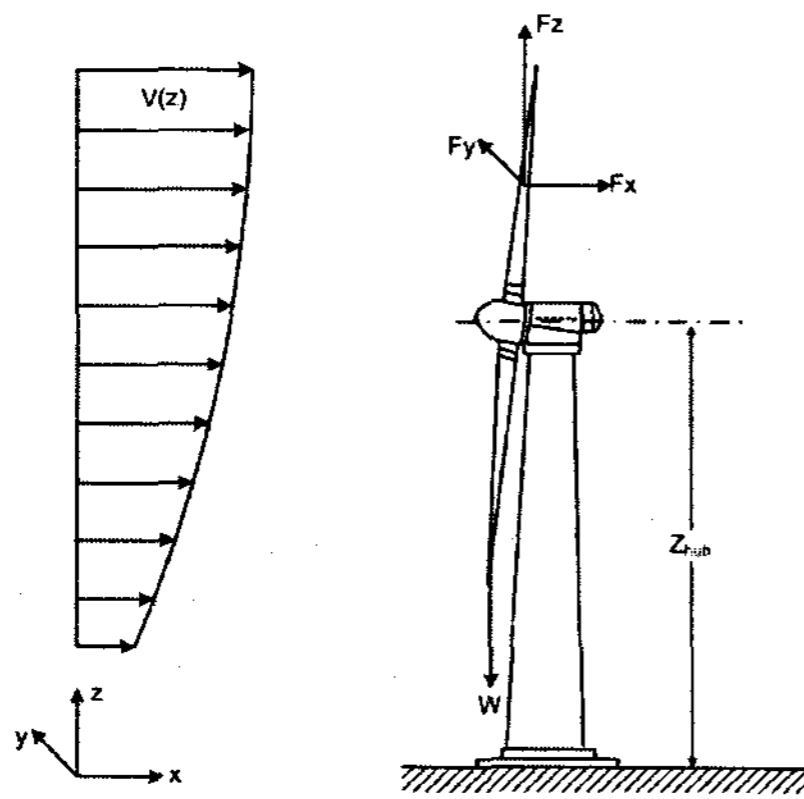


Fig. 2 Normal wind profile

Fig. 2는 지상 속도 분포와 풍력 터빈에 작용하는 힘을 나타낸다. 여기서 W 는 블레이드의 자중을 의미하며 F_z 는 회전에 의한 원심력, F_y 는 토크를 야기하는 블레이드 회전면 위의 힘, F_x 는 추력(항력)을 의미한다. 3가지 공기력 F_x , F_y , F_z 는 입력 풍속의 제곱에 비례하므로 블레이드가 경계층

내부를 회전하면서 유입 속도 변동에 의해 주기적인 하중 변화가 발생하게 된다. 이에 의해서 허브와 저속 동력 전달축에 동적 하중 변동을 일으킨다.

3. 하중 해석 조건

본 연구에서 하중 해석을 하기 위한 풍력 터빈의 제원은 Table 1과 같다 [4].

Table 1. Main parameters of HAWT

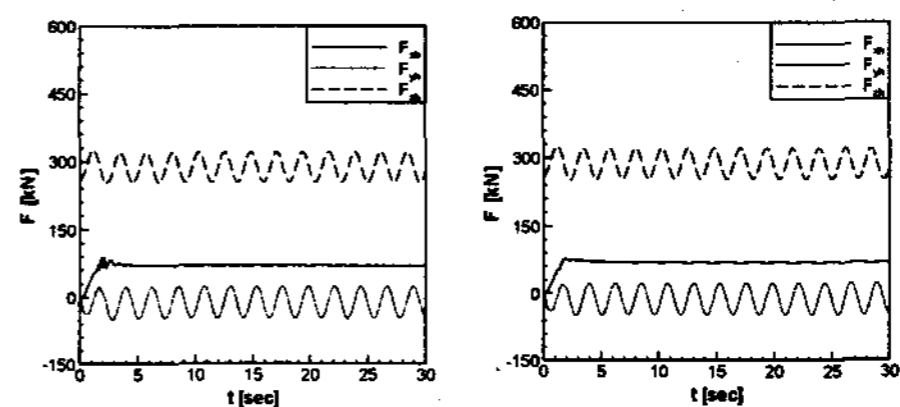
Parameter	Value
Diameter (m)	60.6
Number of blade	3
Rated power (MW)	1
Rated wind speed (m/s)	12
Hub height (m)	70
RPM	26.5

정격 풍속 12m/s로 하였으며, WGTS Class III에 높은 난류 특성 (A)을 갖는 것으로 정하였다 [5].

4. 결과 및 토의

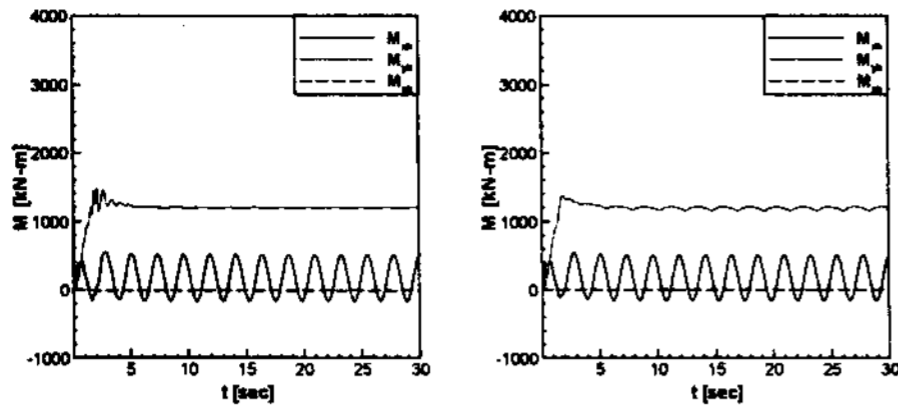
Fig. 2에서 나타낸 풍력 터빈 블레이드의 공력 하중 해석을 위해서 바람조건은 균일 흐름장과 지상 경계층 흐름을 모델링한 정규 흐름 형상(normal wind profile)의 두 가지 경우에 대하여 해석을 수행하였다. 해석은 하중 값이 크게 나타나는 허브측과 토크가 크게 작용되는 저속 동력 전달축에 대해서 각각 6분력 결과를 얻어내었다.

4.1 허브측 하중



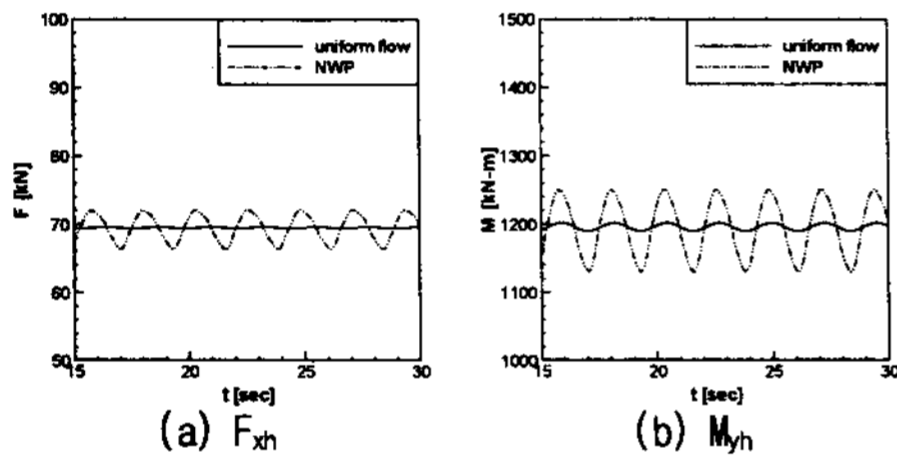
(a) Uniform flow (b) Normal wind profile

Fig. 3 흐름에 따른 허브측 하중



(a) Uniform flow (b) Normal wind profile
 Fig. 4 흐름에 따른 허브축 모멘트

허브축에 나타나는 하중은 Fig. 3과 같이 시간에 따라서 일정한 주기를 가지고 작용하는데 이 때, 최대 하중은 325.1kN으로 회전에 의한 원심력과 중력에 의해서 나타나며 블레이드의 방위각에 따라서 주기성을 보임을 알 수 있다. 또한, Fig. 4의 모멘트의 경우 y 방향의 모멘트가 1,469kN-m에 이른다.



(a) F_{xh} (b) M_{yh}
 Fig. 5 허브축 하중 및 모멘트 비교

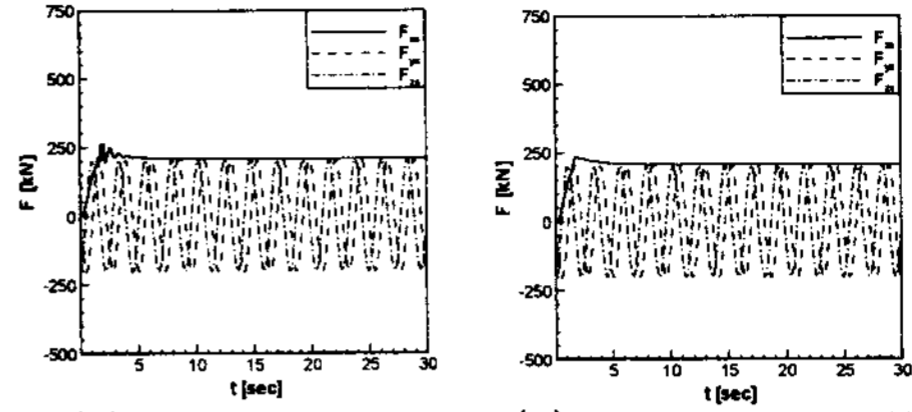
Fig. 5는 허브축에서 발생하는 하중과 모멘트의 진폭의 차이를 나타낸다. Fig. 5(a)에서 나타내고 있는 F_x 의 경우 하중의 평균값은 거의 일정하다. 그러나 진폭을 살펴보면 Table 2에서 나타낸 바와 같이 균일 흐름장일 때는 그 차이가 0.11kN-m로 변동이 미세한 반면 NWP 바람 조건에서는 3.08kN-m로 큰 것을 알 수 있다. 또한 M_y 를 나타내고 있는 Fig. 5(b)에서는 진폭의 차이가 지상 경계층일 때 63.9kN-m, 상대 오차 965%로 상당한 차이를 보임을 알 수 있다. 상대오차는 다음과 같이 정의 하였다.

$$\frac{\text{NWP 조건에서의 값} - \text{균일흐름 조건에서의 값}}{\text{균일흐름 조건에서의 값}} \times 100\%$$

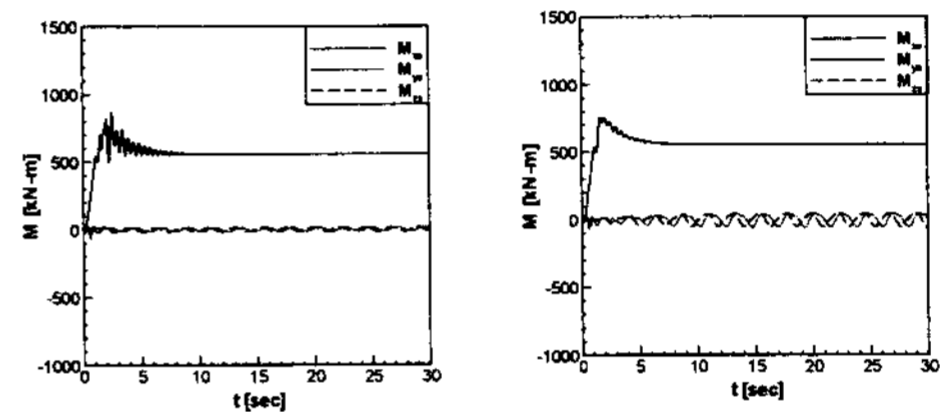
Table 2.는 계산 결과를 요약한 것으로 균일 흐름장과 정규 흐름장의 6분력 하중에 대한 각각의 평균치와 하중 변동의 진폭, 그리고 균일 흐름장 값에 대한 정규 흐름장의 상대오차를 나타낸 결과이다. 전체적으로 균일흐름장에 비해서 NWP흐름 조건이 하중의 진폭을 크게 증가시키고 있음을 알 수 있다. 그러나 각각의 바람조건에서 허브와 LSS의 6분력하중의

시간에 따른 평균치는 차이가 없음을 알 수 있다.

4.2 LSS축 하중

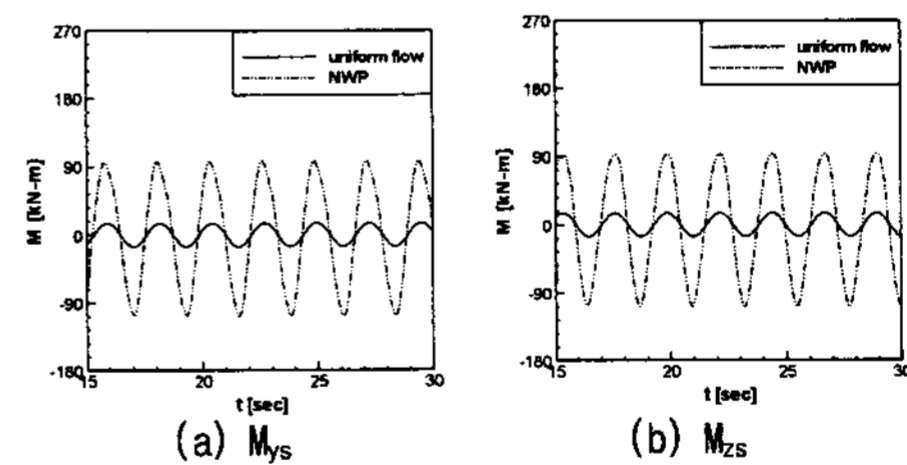


(a) Uniform flow (b) Normal wind profile
 Fig. 6 흐름에 따른 LSS 하중



(a) Uniform flow (b) Normal wind profile
 Fig. 7 흐름에 따른 LSS 모멘트

LSS의 하중은 지상 경계층에서의 영향이 미세하게 작용한다. 또한 모멘트에서는 균일 흐름장 일 때는 거의 일정한 값에서 작은 진폭을 가지고 진동하지만 지상 경계층에서는 큰 진폭을 가지고 변화하는 것을 볼 수 있다.



(a) M_{ys} (b) M_{zs}
 Fig. 8 LSS축 모멘트 비교

LSS축 하중은 3개의 블레이드의 합성력과 블레이드 자중이 전달되는 하중을 의미한다. Fig. 6에서 추력 방향으로 최대 250kN 정도에 이르며 Fig. 7에서 모멘트 최대 값은 토크로 854kN-m 정도의 값을 보인다. 특히 y방향과 z방향의 LSS축 굽힘 모멘트는 균일 흐름장과 정규 흐름 형상에 의한 각각의 값들이 Fig. 8에서 나타낸 바와 같이 커다란 차이를 보이고 있다. 각각의 모멘트는 정규 흐름장의 모멘트가 균일 흐름장의 모멘트에 비해 대략 520% 정도 더 큰 값을 보이고 있다.

Table 2. Calculated loads for uniform and NWP wind conditions

		Uniform Flow		Normal Wind Profile		Relative amplitude Error (%)
		mean	amplitude	mean	amplitude	
Hub	Fx	69.5kN	0.11	69.4kN	3.08	2,700
	Fy	-11.8kN	36	-11.8kN	36.2	0.6
	Fz	286.6kN	33.4	286.6kN	34.2	2.4
	Mx	164.4kN-m	344.4	164.4kN-m	345.9	0.4
	My	1,195.7kN-m	6	1,194.5kN-m	63.9	965
	Mz	-11.9kN-m	4.2	-11.9kN-m	4.4	4.8
LSS	Thrust	208.5kN	0.05	208.2kN	0.15	200
	Fy	3.5kN	202.6	3.5kN	203.9	0.6
	Fz	-2.2kN	201.4	-2.3kN	202.4	0.5
	Torque	556kN-m	0.7	555.3kN-m	0.8	14.3
	My	0.2kN-m	15.6	1.2kN-m	96.4	518
	Mz	0.3kN-m	15.7	1.7kN-m	95.6	508.9

References

[1] V. D. Hunt, Wind power, Van Nostrand Reinhold Company, 1981

[2] B. H. Bailey, "Predicting vertical wind profiles as a function of time of the day and surface wind speed," Proceedings of an International Colloquium on Wind Energy, BWEA, Brighton, UK, 1981.

[3] S. A. Hsu, "Determining the power-law wind-profile exponent under near neutral stability conditions at sea," Journal of Applied Meteorology, pp. 757-765, 1994

[4] 유기완, "가변 피치형 수평축 풍력 터빈의 공력 최적 설계 및 피치제어 성능 연구," 한국항공우주학회, 제 30권 제 10호, pp. 891~898, 2007

[5] IEC-61400-1, Wind Turbine Generator Systems, Part 1: Safety Requirements. International Electrotechnical Commission, Geneva, Swiss, 1999

5. 결론

본 연구를 통해 균일흐름장과 지상 경계층 두 가지 유동 조건하에서의 수평축 풍력 터빈 블레이드의 허브와 저속 동력 전달축에 작용하는 6분력 하중과 모멘트를 각각 상호 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻어 내었다.

1. 평균치에 해당하는 값은 두 바람 조건에서 서로 차이가 없음을 알 수 있다.
2. 지상 경계층에 의한 흐름 변동에 의해 블레이드 허브에서의 굽힘 모멘트가 96% 증가되며, LSS에서는 추력이 200%의 증가를 보였고, 2개의 굽힘 모멘트는 각각 520% 정도의 증가 현상이 발생되었다. 따라서 단순 계산을 위해 균일 흐름 가정을 하는 것은 피로 해석 측면에서 적절하지 않음을 알 수 있고, 정확한 해석을 위해 NWP를 고려하는 것은 필수적이다.