

신규 익형 KA2가 적용된 풍력 블레이드의 공력 하중에 대한 동특성 해석

강상균* · 이지현** · 이장호***†

Analysis of the Dynamic Characteristics on Aerodynamic Loads of Wind Turbine Blade with New Airfoil KA2

Sang-Kyun Kang*, Ji-Hyun Lee**, Jang-Ho Lee***†

Key Words : Aerodynamic load(공력 하중), Airfoil(익형), Dynamic characteristic analysis(동특성 분석), Wind turbine blade(풍력 블레이드)

ABSTRACT

This paper proposes a novel airfoil named “KA2” for the blade of the wind turbine systems. Dynamic loads characteristics are analyzed and compared using aerodynamic data of ten airfoils including the proposed airfoil. The blade is divided into the sixteen elements in the longitudinal direction of the blade for applying the Blade Element Method Theory (BEMT) method, and in each element, torque, thrust, and pitching moment are calculated using turbulent time varying wind speed and aerodynamic data of each wing. Additionally, each force and torque is accumulated in the whole region of the blade for the estimation of representative values. The magnitude of such forces is comparatively analyzed for different airfoils. The angle of attack is constant below the rated wind speed due to the fact that the tip speed ratio is kept at the constant value, and it increases in the region of over rated wind speed as the tip speed ratio decreasing with constant rated rpm and increasing wind speed. Such increase in the angle of attack causes the changes of the force acting on the airfoil with different characteristics of lift and drag in the stall region of each different airfoil. Even though the mean wind speed is in the rated speed in a given time, because of the turbulence, it has either the over rated or under rated speed most of the time. Furthermore, the dynamic properties of each force are analyzed in this rated wind speed in order to objectively understand the dynamic properties of the blades which are designed based on the different airfoils. These dynamic properties are also compared by the standard deviation of time varying characteristics. Moreover, the output characteristics of the wind turbine are investigated with different airfoils and wind speeds. Based on these investigations, it was revealed that the proposed airfoil (KA2) is well applicable to the blade with passive pitch control system.

용어 설명

	symbol	Unit			
			C_L	양력계수	[-]
			C_m	피칭모멘트계수	[-]
α_A	받음각	[degree]	dL	해석요소의 양력	[N]
β	부착각도	[degree]	dD	해석요소의 항력	[N]
C_D	항력계수	[-]	dM	해석요소의 피칭모멘트	[N · m]
			dr	해석요소의 반경방향길이	[m]

* 군산대학교 풍력기술연구센터(Break-through Technology Center for Urban Wind Energy System, Kunsan National University)

** (주)삼원밀레니엄(Samwon Millennia, Inc)

*** 군산대학교 기계자동차조선해양공학부(School of Mechanical, Automotive, Shipbuilding and Marine Engineering, Kunsan National University)

† 교신저자, E-mail : jangho@kunsan.ac.kr

dS	해석요소의 추력	[N]
dT	해석요소의 토크	[N · m]
λ_R	끝단 주속비	[-]
P	출력	[W]
ρ	밀도	[kg/m ³]
r	회전반경	[m]
R	로터 반지름	[m]
ϕ	회전면과의 각도	[degree]
t	코드길이	[m]
U	회전면에 작용하는 힘	[N]
V	풍속	[m/s]
V_R	상대풍속	[m/s]
ω	각속도	[rad/s]
z	블레이드 수	[-]
σ	편차	[-]

Table 1 Wind turbine specification⁽⁷⁾

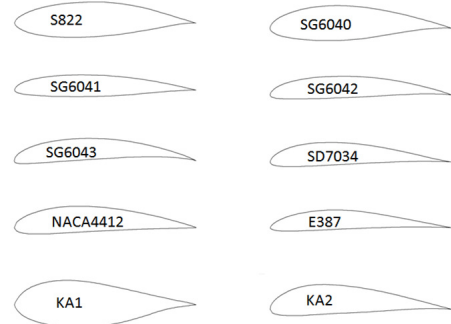
Item	Condition
Power [kW]	10
Rated wind speed [m/s]	10
Radius [m]	3.5
Revolutions per minute [rpm]	120
Blade number [EA]	3
Tip speed ratio [-]	4.4
Radius of hub [m]	0.15

1. 서 론

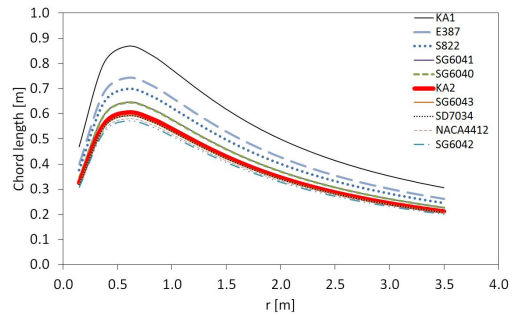
풍력발전 시스템의 공기역학적 손실이 발생하는 풍력 블레이드는 최대한의 전력이 나오도록 발전기를 충분히 빠르게 회전시켜야 하지만 과회전이 발생되어 풍력발전 시스템이 위험한 상태로 되지 않도록 해야 된다. 이를 위해 설계 조건에 부합되는 공력특성을 갖는 익형과 블레이드가 설계단계에서부터 검토되어야 한다. 항공 산업의 발전으로 수많은 익형의 형상이 개발되었지만 항공기 날개는 기체를 공중으로 띄우기 위해 설계되어야 하며, 풍력 블레이드는 바람의 힘에 의해 회전하도록 설계되어야 한다. 항공기 날개의 레이놀즈수는 대체적으로 항공기에 따라 대개 한 가지 값으로 정해지지만, 풍력발전기는 하나의 날개에 대해 위치 및 작동 상태에 따라 레이놀즈수의 범위가 매우 넓기 때문에 레이놀즈수에 따라 그 성능이 크게 변하지 말아야 한다.⁽¹⁾ 또한 항공기 날개의 받음각은 최대 30도를 넘지 않고 실속 전의 공력특성만을 이용하지만, 풍력 블레이드의 받음각은 이보다 크기 때문에 전범위의 공력특성이 확인되어야 한다. 따라서 작동 조건에 부합하는 익형 형상의 선택과 블레이드의 설계가 필요하다.

강덕훈⁽²⁾ 등은 기존 익형의 중요 형상 인자인 앞전 반지름, 최대 두께 위치, 최대 캠버의 위치, 캠버 크기가 변할 때 익형의 성능을 분석한 뒤 이를 바탕으로 신규 익형 KA1을 설계하고 디지털 풍동을 이용하여 이를 검증하였다. 우영진⁽³⁾ 등은 기존익형(SD7062)를 기반으로 설계인자가 익형의 양력특성에 미치는 영향을 분석하고, 이와 같은 결과를 기준으로 양력이 증가하기 위한 설계 조건을 파악한 후 풍력 블레이드에 적용 가능한 신규 익형 KA2를 설계하였다. 또한 수치해석을 활용하여 신규 익형의 특성을 검토하였다. 이와 같은 연구들은 신규 익형을 개발하고, 실험 및 수치해석을 통하여 익형을 검증하였으며, 본 연구에서 검토된 신규 익형 KA2의 분석에 기초가 되었다.

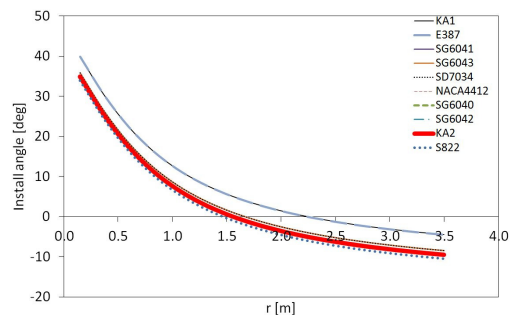
Emrah Kulunk⁽⁴⁾는 BEMT (Blade Element Momentum Theory)를 활용한 블레이드 설계 및 끝단 손실을 분석하는



(a) Shape of airfoils



(b) Chord length for different airfoils



(c) Blade install angle for different airfoils

Fig. 1 Shape of airfoils, chord length and install angle of preceding research⁽⁷⁾

방법에 대하여 이론적으로 설명하였지만 실제 블레이드에 대한 설계 및 분석은 수행되지 않았다.

윤진용⁽⁵⁾는 Xfoil을 이용하여 익형의 양력계수와 항력계수를 산출하고, MATLAB GUI (MATLAB Graphical User Interfaces)를 이용하여 블레이드 공력설계를 수행하는 프로

Table 2 Lift coefficient in the design point of different airfoils

Airfoil	Angle of attack [deg]	Lift coefficient [-]
SG6042	18	1.62
NACA4412	18	1.59
SG6043	17	1.56
SD7034	17	1.56
KA2	18	1.53
SG6040	18	1.44
SG6041	17	1.43
S822	19	1.32
E387	13	1.25
KA1	13	1.06

그램을 개발하였고, 모장오⁽⁶⁾ 등은 BEMT 이론을 활용하여 1kW급 풍력 블레이드 설계를 수행하고, 성능평가를 위한 소프트웨어를 개발하였다. 이때, 익형 별 공력특성은 Xfoil이 활용되었으며, 실속 이후에서는 Viterna의 실속 후 공력특성 예측 모델이 적용되었다. 이와 같은 연구들을 살펴보면 Xfoil을 활용하여 익형의 공력특성을 확인하고, BEMT를 적용하여 블레이드를 설계하며, 이에 대한 성능을 평가하는 단계로 이루어진다. 하지만 다수의 블레이드에 대한 설계 및 성능 평가가 이루어지지 않아 서로 다른 익형으로 설계된 블레이드에 대한 성능 비교가 수행되지 않았으며, 풍속의 변화에 따라 변동하는 블레이드에 작용되는 힘들의 변화는 분석되지 않았다. 따라서 여러 가지 익형을 활용하여 블레이드를 설계하고 이를 서로 비교하는 연구가 필요하며, 16% 이상의 강한 난류와 극심한 풍속 변화 특성을 보이는 실제 현장 운전 조건에서 시간에 따라 변동하는 여러 가지 힘들의 동특성 분석이 필요하다.

본 연구에서는 Xfoil과 BEMT를 이용하여 여러 가지 익형으로 블레이드를 설계한 선행연구⁽⁷⁾를 활용하여 추력, 토크, 피칭모멘트 동특성을 분석하고, 이를 상호 비교 하였으며, 시간에 따라 변화하는 난류 풍속 조건에서의 변동하는 힘들의 특성을 분석하고 상호 비교하였다. 이는 블레이드의 공력 설계 및 구조설계뿐만 아니라 여러 가지 형태의 피치제어기 설계의 근거 자료로 활용될 수 있을 것이다.

2. 블레이드 검토

기존 연구에서 검토된 풍력 터빈은 10 kW 급으로 정격 설계 사양 및 적용환경은 Table 1과 같으며, 익형과 설계된 블레이드 코드길이, 부착각도는 Fig. 1에 나타내었다(자세한 사항은 참고문헌 7 참고 바람). 블레이드는 전체 길이에 대해 반경방향으로 16개의 요소로 구분되어 식 (1)~(5)가 적용되어 설계되었다.⁽⁷⁾

코드길이는 팁에서 루트 방향으로 증가하다 83% 지점의 길이에서 최댓값을 가진 후 점차 감소하는 경향을 보인다.

KA2의 경우 코드길이가 가장 큰 KA1보다 44% 작고, 코드길이가 가장 작은 SG6042보다 6% 크게 확인되었다. 식 (1)에 의해 결정되는 블레이드 코드길이는 풍력 터빈의 설계 사양이 적용되어 주속비, 블레이드 길이, 회전면과의 각도, 블레이드 수가 모든 익형에서 동일하다. 따라서 블레이드 코드길이는 정격 설계점의 받음각에서 발생하는 양력계수로 결정된다. KA2를 포함하여 여러 가지 익형에 대한 설계점에서의 양력계수는 Table 2에 나타내었으며, 코드길이는 양력계수와 반비례하기 때문에 양력계수가 작을수록 코드길이는 크게 나타난다. KA2는 설계점의 받음각 18도에서 양력계수 1.53으로 상위 50%에 해당하며, 블레이드 길이는 상위 50%에 해당한다.

$$t(r)_{Schmitz} = \frac{1}{z} \frac{16\pi r}{C_L} \sin^2\left(\frac{1}{3}\phi_1\right) \quad [\text{m}] \quad (1)$$

$$\lambda_R = \frac{R\omega}{V_1} \quad [-] \quad (2)$$

$$\phi_1 = \tan^{-1}\left(\frac{R}{\lambda_R r}\right) \quad [\text{deg}] \quad (3)$$

$$\phi_2 = \frac{2}{3}\phi_1 \quad [\text{deg}] \quad (4)$$

$$\beta = \phi_2 - \alpha_A \quad [\text{deg}] \quad (5)$$

부착각도는 날개 안쪽에서 끝 쪽으로 갈수록 작아지는 특성을 갖는다. 이것은 회전날개의 반경방향에 따라 증가되는 회전속도가 상대풍속과 회전면과 이루는 각도를 감소시키기 때문에 나타나는 특성이다.

3. 블레이드 동특성 분석

3.1 동특성 분석 방법

동특성 분석 시 양력과 항력은 각각 식 (6)과 식 (7)과 같이 계산되며, 이때의 상대속도는 식 (8)과 같이 계산된다.⁽⁸⁾

추력은 양력과 항력의 벡터 y축 요소의 합으로 식 (9)와 같이 계산된다. 회전방향에 작용하는 힘은 양력과 항력의 벡터 x축 요소의 합으로 식 (10)과 같이 계산되며, 식 (11)을 통해 토크를 계산할 수 있다.

피칭모멘트는 식 (12)으로 계산된다. 피칭 모멘트는 익형 단면에 수직인 축 성분의 모멘트로 보통 작용점이 중요한데 통상 아주 얇은 익형의 경우 공력 중심인 시위선상 앞전으로부터 t/4인 거리에 있는 곳에 작용한다. 위와 같은 계산 방법은 블레이드의 루트부터 팁까지 총 16개의 요소로 분리된 구

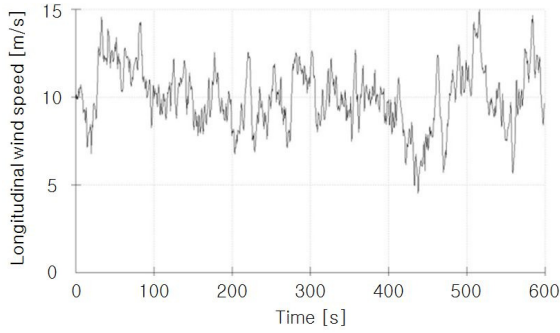


Fig. 2 Turbulent wind speed generated by GH-Bladed

Table 3 Standard deviation of thrust

Wings	σ_{rated} [N]	$\sigma_{over\ wind}$ [N]
SG6040	131.5	17.6
SG6041	131.1	17.3
KA2	131.3	13.1
KA1	131.3	10.4
SD7034	131.3	10.0
S822	131.5	6.4
NACA4412	131.4	5.8
E387	131.2	4.6
SG6042	131.3	3.9
SG6043	131.4	3.6

간에 차례로 적용되며, 각 구간에서 산출된 값을 합산하여 블레이드 전체의 값을 산출하게 된다.

$$dL = \frac{1}{2} \rho V_R^2 t dr C_L(\alpha) \quad [N] \quad (6)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho V_R^2 t dr C_D(\alpha) \quad [N] \quad (7)$$

$$V_R = \sqrt{\left(\frac{2}{3} V_1\right)^2 + (r\omega)^2} \quad [m/s] \quad (8)$$

$$dS = dL \cos \phi_2 + dD \sin \phi_2 \quad [N] \quad (9)$$

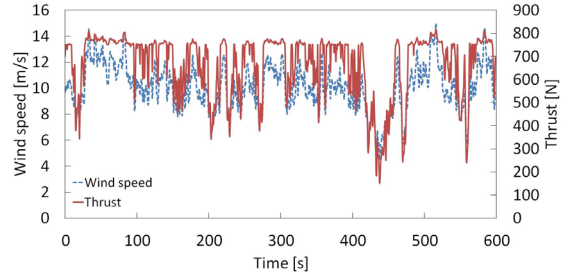
$$dU = dL \sin \phi_2 - dD \cos \phi_2 \quad [N] \quad (10)$$

$$dT = dU \times r \quad [N \cdot m] \quad (11)$$

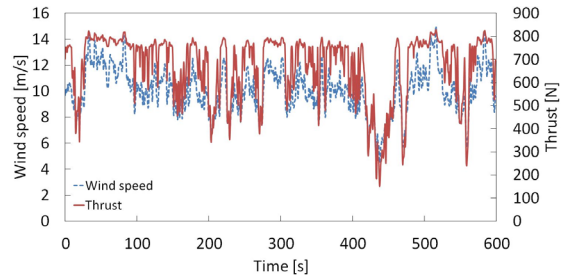
$$dM = \frac{1}{2} \rho V_R^2 t^2 dr C_m(\alpha) \quad [N \cdot m] \quad (12)$$

3.2 바람생성

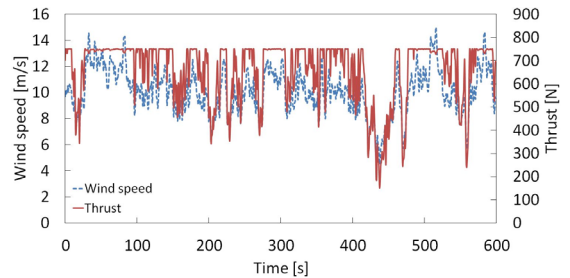
식 (3)~(5)에 의하여 정격풍속 이하에서는 주속비가 일정



(a) KA2



(b) SG6040



(c) SG6043

Fig. 3 Dynamic characteristics of thrust with a turbulent wind speed

하여 받음각이 일정하며, 과풍속에서는 주속비가 변하기 때문에 받음각이 변화한다. 이러한 받음각의 변화로 인하여 익형에 작용되는 힘들이 변화하게 된다. 생성된 바람과 받음각의 변화를 기반으로 각 힘들의 동특성이 분석되었다. 또한 신규 익형 KA2를 포함하여 10개 익형을 기반으로 설계한 블레이드의 동특성을 객관적으로 파악하기 위하여 식 (13)을 적용하여 표준편차를 산출하였다. 변화하는 바람은 Wind turbine classes⁽⁹⁾의 규격에 맞추어 GH-Bladed를 이용하여 인위적으로 생성하였다. 바람은 정격 풍속인 10 m/s를 평균 풍속으로 설정하였으며, 주파수 1.7 Hz, 난류강도 18%, 최소 풍속 4.5 m/s, 최대 풍속 15 m/s이다. 생성된 바람은 Fig. 2와 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (M - M_{mean})^2}{n}} \quad (13)$$

3.3 추력 동특성 분석

산출된 추력 동특성의 표준편차는 Table 3과 같다. KA2

Table 4 Standard deviation of torque

Wings	σ_{rated} [N·m]	$\sigma_{over\ wind}$ [N·m]
SG6041	51.6	24.0
KA2	49.3	17.7
SG6040	48.0	17.7
E387	51.0	17.6
S822	47.7	14.3
KA1	50.1	12.2
SD7034	50.1	9.6
NACA4412	48.6	8.1
SG6042	49.9	5.7
SG6043	48.9	4.4

는 정격풍속 이하 구간에서 표준편차 131.3 N으로 상위 50% 안에 포함되고, 과풍속 구간에서 표준편차 13.1 N으로 상위 30% 안에 포함된다.

정격풍속 이하 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 S822로 표준편차는 131.5 N이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 SG6041 N이다. 과풍속 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 SG6040으로 17.6 N이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 SG6043으로 3.6 N이다.

Fig. 3에 KA2 및 과풍속 구간에서 변동성이 가장 큰 익형과 가장 작은 익형의 추력 동특성을 나타내었다.

3.4 토크 동특성 분석

산출된 토크 동특성의 표준편차는 Table 4와 같다. KA2는 정격풍속 이하 구간에서 표준편차 49.3 N·m로 상위 60% 안에 포함되고, 과풍속 구간에서 표준편차 17.7 N·m로 상위 20% 안에 포함된다.

정격풍속 이하 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 SG6041로 표준편차는 51.6 N·m이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 S822로 47.7 N·m이다. 과풍속 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 SG6041로 24.0 N·m 이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 SG6043으로 4.4 N이다.

Fig. 4에 KA2 및 과풍속 구간에서 변동성이 가장 큰 익형과 가장 작은 익형의 토크 동특성을 나타내었다.

3.5 피칭모멘트 동특성 분석

산출된 피칭모멘트 동특성의 표준편차는 Table 5와 같다. KA2는 정격풍속 이하 구간에서 표준편차 1.5 N·m로 상위 30% 안에 포함되고, 과풍속 구간에서 표준편차 2.6 N·m로 하위 30% 안에 포함된다. 정격풍속 이하 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 SG6043으로 표준편차는 2.2

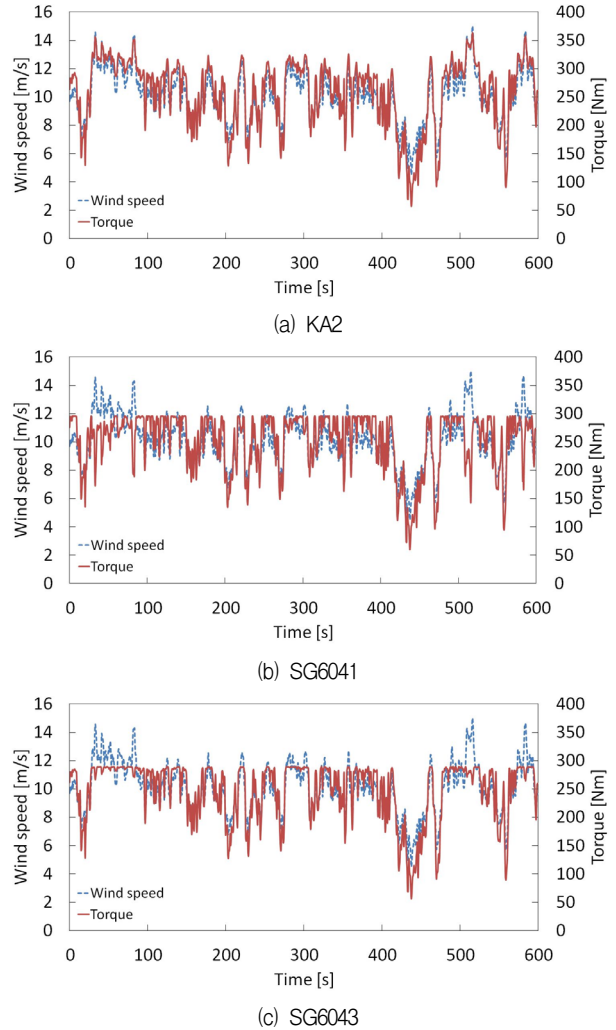


Fig. 4 Dynamic characteristics of torque with a turbulent wind speed

Table 5 Standard deviation of pitching moment

Wings	σ_{rated} [N·m]	$\sigma_{over\ wind}$ [N·m]
E387	1.7	4.4
S822	0.5	4.2
SG6041	0.3	4.0
SG6042	1.1	3.3
SG6043	2.2	3.2
SD7034	1.3	2.9
SG6040	1.1	2.7
KA2	1.5	2.6
NACA4412	1.3	2.5
KA1	0.8	1.7

N·m이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 SG6041로 표준편차는 0.3 N·m이다. 과풍속 구간에서 변동성이 가장 크게 확인되는 익형은 E387로 표준편차는 4.4 N·m 이고, 변동성이 가장 작게 확인되는 익형은 KA1으로 표준편차는

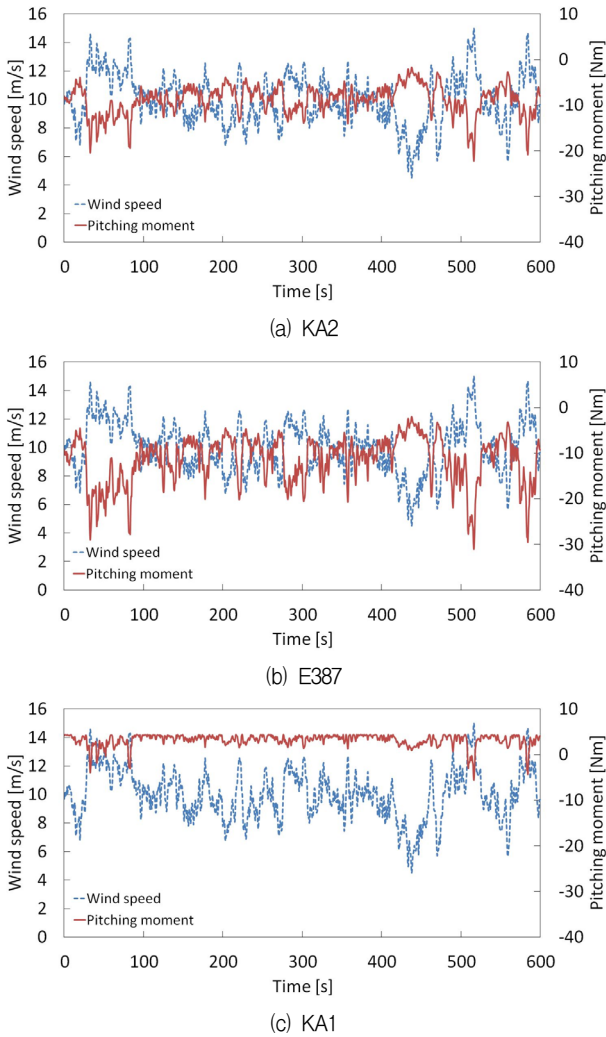


Fig. 5 Dynamic characteristics of pitching moment with a turbulent wind speed

1.7 N · m이다. Fig. 5에 KA2 및 과풍속 구간에서 변동성이 가장 큰 익형과 가장 작은 익형의 피칭모멘트 동특성을 나타내었다.

4. 풍력터빈의 출력

풍력터빈의 출력은 블레이드에 작용하는 토크와 회전수의 곱에 블레이드의 수를 곱하여 계산 할 수 있으며, 식 (14)와 같다.⁽¹⁰⁾ 이는 토크 동특성 분석을 통하여 출력 특성을 산출할 수 있음을 의미한다.

KA2를 포함하여 서로 다른 익형 10개를 기반으로 설계된 풍력터빈의 출력 특성은 Fig. 6과 같다. 출력은 4.5 m/s부터 15 m/s까지 나타내었으며, 이는 토크 동특성 분석 시 적용된 풍속의 최소 풍속과 최대 풍속의 범위이다.

정격풍속 이하 구간에서는 모든 블레이드에서 출력이 유사한 값을 나타내는 것으로 확인되었다. 정격 풍속 10 m/s에서 KA2의 출력은 10.59 kW로 출력의 평균(10.64 kW)과 우

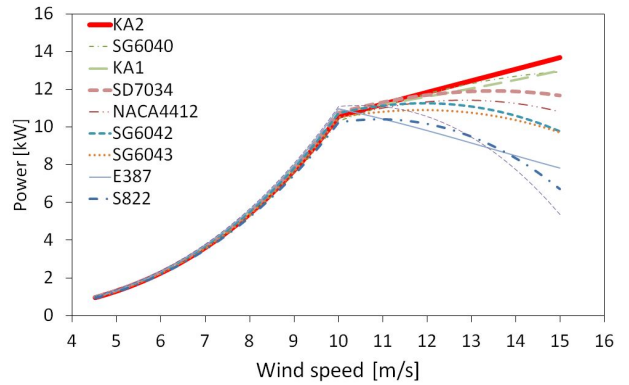


Fig. 6 Wind turbine power curves for different airfoils with wind speed

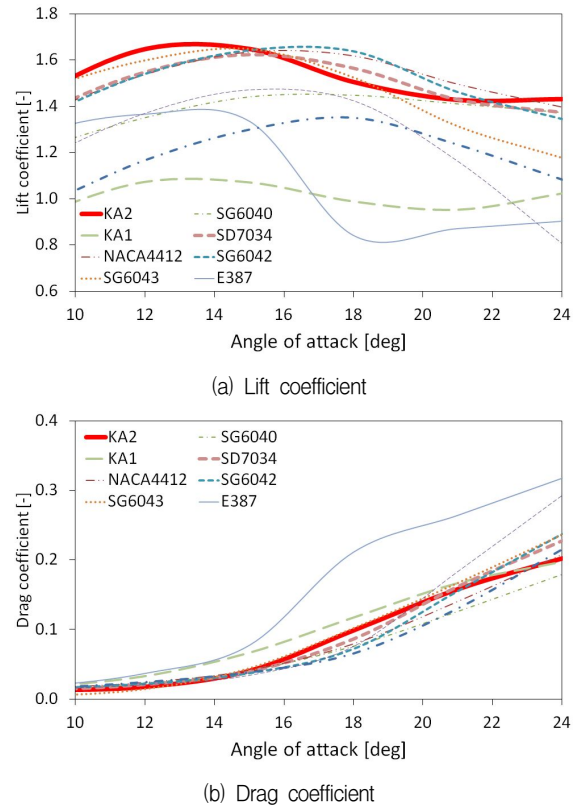


Fig. 7 Lift coefficient and drag coefficient of different airfoils⁽⁷⁾

사한 값으로 확인되었고, 가장 큰 출력을 나타내는 익형인 SG6041(11.09 kW)보다 5% 낮게 확인되었다.

$$P = T \cdot \omega \cdot z \quad [W] \quad (14)$$

과풍속 영역의 풍속 15 m/s에서 KA2의 출력은 13.70 kW로 가장 큰 출력을 나타내는 것으로 확인되었고, 평균 출력(10.15 kW)보다 35% 높게 확인되었으며, 가장 낮은 출력을 나타내는 익형인 SG6041(5.37 kW)보다 155% 높게 확인되었다. 과풍속 영역에서 풍속의 증가에 따라 블레이드의 출력

Table 6 Mean ratio of change

Airfoil	Lift coefficient [-]	Drag coefficient [-]
KA2	-0.013	0.015
SG6040	-0.016	0.017
KA1	-0.018	0.012
SG6042	-0.021	0.019
SD7034	-0.027	0.021
NACA4412	-0.031	0.021
S822	-0.045	0.031
SG6043	-0.052	0.021
E387	-0.074	0.022
SG6041	-0.097	0.028

이 감소하거나 증가하는 등 그 경향이 익형에 따라 서로 다르게 나타난다. 이는 정격회전수가 유지되는 가운데 풍속의 증가로 인하여 주속비가 감소하고 받음각이 증가하여 발생하는 실속영역에서 양력계수가 감소되는 정도와 항력계수가 증가되는 정도가 익형마다 서로 다르기 때문에 발생한다.

과속영역에서 풍속이 증가하여 운동에너지가 증가함에도 불구하고 출력이 감소하는 블레이드는 풍속이 증가에 하면서 실속 현상이 발생하여 양력이 급격하게 감소하고, 항력의 증가로 인하여 토크를 산출하는 식 (10)과 식 (11)에서 보는 바와 같이 운동에너지의 증가보다 더 많이 토크가 감소되기 때문이다.

반대로 과속영역에서 출력이 풍속과 함께 지속적으로 증가하는 블레이드는 Fig. 7과 같이 풍속의 증가로 실속 현상이 발생하지만 실속 후 양력계수의 감소율이 크지 않고, 일정 값 이상으로 유지되어 항력이 증가하여도 토크가 감소하지 않고 증가하기 때문이다. 따라서 양력계수의 감소율과 항력계수의 증가율이 작은 익형이 적용되면, 블레이드의 토크와 출력이 증가된다.

KA2는 본 연구에서 검토된 서로 다른 익형 10개 중 양력계수의 평균 변화율이 가장 작고, 항력계수의 평균 변화율이 하위 20 %에 포함되어 큰 토크가 산출되는 것으로 확인되었다. 평균 변화율은 식 (15)가 활용되었으며, 각 익형별 평균 변화율은 Table 6과 같다.

$$\frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \tag{15}$$

과풍속 구간에서 정격 출력 이상의 과도한 출력은 발전기 손상이나 파손을 야기하므로 적절한 출력 제어를 통하여 안정성을 유지하여야 한다. 과풍속에서 출력이 증가하는 KA2는 피칭모멘트가 크고, 풍속의 변화에 따른 피칭모멘트의 변동성이 적기 때문에 수동형 피치제어 모듈에 적합하고, 성능 감소가 가능 할 것으로 예측된다.

5. 결론 및 고찰

본 연구에서는 블레이드에 발생하는 여러 가지 힘들의 산출 방법 들을 제시하였으며, 신규 익형 KA2를 포함하여 서로 다른 익형 10개로 설계된 블레이드를 길이방향으로 16 개 요소로 분할한 부분에 대해 제시한 산출방법을 적용하여 힘을 산출하였고, 이들의 특성을 상호 비교하였다. 이를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 각 힘들의 동특성 분석 결과 KA2의 추력과 토크는 정격 풍속 이하 구간에서 서로 다른 익형과 비교 시 변동성은 평균값을 나타내는 것으로 확인되었고, 과풍속 구간에서는 변동성이 상위 30%로 높게 확인되었다. 피칭모멘트의 경우 정격풍속 이하 구간에서 변동성이 상위 30%로 높게 확인되었지만, 과풍속 구간에서는 변동성이 하위 30%로 낮게 확인되었다.
- (2) 신규 익형 KA2를 포함하여 서로 다른 10개의 익형에 대하여 정격 설계 사양 및 적용환경이 반영된 풍력터빈의 출력은 정격풍속 이전 구간에서는 유사한 값을 보이지만, 과풍속 구간에서는 실속 후 양력계수와 항력계수의 각기 다른 특성으로 인하여 풍력터빈의 출력 특성이 결정되는 것으로 확인되었다.
- (3) 신규 익형 KA2는 양력계수가 우수하고, 실속 이후 양력계수의 감소율과 항력계수의 증가율이 작아 풍력 블레이드에 적용 시 큰 회전 토크가 산출되어 높은 출력을 나타내는 것으로 확인되었다.
- (4) KA2는 과풍속 구간에서 블레이드에 작용되는 피칭모멘트가 크고, 변동성이 적은 것으로 확인되어 피칭모멘트를 이용한 수동형 피치제어 모듈 적용에 적합한 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20143010024330), (No.2012T100100650).

References

- (1) Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., and Bossanyi, E., 2001, "Wind energy handbook", John Wiley & Sons.
- (2) Kang, D. H., Woo, Y. J., and Lee, J. H., 2012, "A study on the development for the airfoil of wind turbine blade using digital wind tunnel", The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol, 15, No. 5, pp. 42~47.
- (3) Woo, Y. J. and Lee, J. H., 2014, "Study on aerodynamic

- characteristics of the original airfoil, ka2. for the application of wind turbine blade”, *Journal of Wind Energy*. Vol. 15, No. 5. pp. 33~42.
- (4) Kulunk, E., 2011, “Fundamental and Advanced Topics in Wind Power” in “Aerodynamics of Wind Turbines”, INTECH Open Access Publisher, pp. 1~18.
- (5) Yoon, J. Y., 2013, “A study on the aerodynamic blade design and verification for small horizontal axis wind turbines”, Gangwon National Univ, Master’s thesis.
- (6) Mo, J. O., Kim, B. S., Kim, M. E., Choi, Y. D., and Lee, Y. H., 2011, “Software development for the performance evaluation and blade design of a pitch-controlled hawt based on BEMT”, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 14, No. 2, pp. 5~10.
- (7) Kang, S. K., Lee, J. H., and Lee, J. H., 2014, “Aerodynamic characteristics of several airfoils for design of passive pitch control module of 10 kw class”, *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 38, No. 6, pp. 609~617.
- (8) Burton T., Jenkins, N., Sharpe, D., and Bossanyi, E., 2011, “Wind energy handbook second edition”, WILEY.
- (9) IEC 61400-1 ed.2
- (10) Lim, C. W. and Kim, S. G., 2012, “Torque control of wind turbine using nonlinear parameter of rotor speed in the region of optimal tip speed ratio”, *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol. 15, No. 2, pp. 30~35.