

수평축 풍력발전용 회전날개의 공력성능 해석 및 시동특성 모사에 관한 연구

공창덕* · 방조혁* · 김학봉**

A Study on Aerodynamic Analysis and Starting Simulation for Horizontal Axis Wind Turbine Blade

C.D.Kong* · J.H.Bang* · H.B.Kim**

ABSTRACT

Aerodynamic performance and starting characteristic of wind turbine blade are important factors that determine the whole system as rated power, operating method, etc. Therefore, starting characteristic according to aerodynamic performance, wind speed and blade pitch angle should be examined while wind turbine blade is designed. In this study, the aerodynamic analysis program of 750kW class horizontal axis wind turbine blade was developed and to certify this program, the aerodynamic performance of the commercialized blade was analyzed with it. The analysis result was corresponding to the value presented from manufacturer. And the starting analysis program was developed on the basis of the developed aerodynamic analysis program and starting analysis was performed. As a result, it was confirmed that variable speed operation and variable pitch control are profitable to wind turbine used in low wind speed as our country.

초 록

풍력발전용 회전날개의 공력성능과 시동특성은 정격출력 및 운용방법등의 전체적인 시스템 성능을 결정짓는 중요한 요소이다. 따라서, 풍력발전용 회전날개를 설계한 경우 공력성능과 풍속 및 깃각에 따른 시동특성은 반드시 검토 되어야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 수평축 풍력발전용으로 개발된 회전날개의 공력성능을 해석하기 위한 프로그램을 개발하였으며, 타당성 검증을 위해 상용화 되어있는 회전날개의 공력성능해석을 수행한 결과 회사측에서 제시한 실험치와 잘 일치함을 확인하였다. 또한 개발된 공력 해석 프로그램을 바탕으로 시동특성 해석 프로그램을 개발하여 분석한 결과 우리나라와 같이 저풍속에서 운용되는 풍력발전기에는 가변깃각 제어방식이 유리함을 확인하였다.

*조선대학교 항공우주공학과 (Chosun University, Dept. of Aerospace Eng.)

**한국항공대학교 (Han-Kuk Aviation Univ.)

1. 서 론

풍력발전용 회전날개의 공력성능을 해석하는 이론으로는 풍차이론(Windmill theory)^[1], 그라우어트의 와류이론(Glauert's Vortex theory)^[1] 등이 있으며, 그 결과는 대동소이한 것으로 알려져 있다.

본 연구에서는 공력성능 해석을 위해 그라우어트의 와류이론을 이용하였으며, 주요 성능 변수는 풍속과 깃 각 및 회전수로서 풍속 변화에 대한 출력과 회전수 변화에 대한 출력을 검토하였다. 또한 시동 특성해석을 위해 시간에 대한 깃 끝 속도비와 토크, 회전수 변화등을 초기치 문제로 단순화하여 fourth-order Runge-Kutta^[2] 수치해석 기법을 사용하였으며, 연평균 풍속이 약 4m/s인 우리 나라에서 대용량 풍력발전기를 자력 시동하는 경우 가변 깃 각 제어방식이 효과적이며, 시동시 최대토크를 유지하기 위해서는 가변회전수 발전방식이 유리함을 확인하였다.

2. 공력 성능 해석

2.1 그라우어트의 와류이론

회전 날개의 공력성능 해석에 사용된 그라우어트의 와류이론(The Vortex Theory of Glauert)에 의하면 회전날개 주위에 발생하는 와류계에 의하여 깃의 상대속도는 증가하며 회전면 위에서의 깃에 대한 상대 회전속도는 다음과 같다.

$$\omega + \frac{\Omega}{2} = \left(\frac{1+h}{2}\right)\omega \tag{1}$$

여기서, Ω : 와류계에 의해 증가되는 각속도성분

ω : 깃의 회전 각속도

h : 선회속도비 ($\omega + \Omega = h\omega$)

그리고, 회전면위에서 축방향속도는 다음과 같다.

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} = \frac{1+k}{2} V_1 \tag{2}$$

여기서, V_1, V_2 : 회전면 전후의 축방향 속도

k : 축방향속도비 ($V_2 = kV_1$)

따라서, 깃의 유동각 및 깃에 대한 상대 공기 속도의 크기는 다음과 같다.

$$\begin{cases} \cot I = \frac{U}{V} = \frac{\omega r}{V_1} \frac{1+h}{1+k} = \lambda \frac{1+h}{1+k} = \lambda_e \\ \overline{W} = \frac{V_1(1+k)}{2\sin I} = \frac{\omega r(1+h)}{2\cos I} \end{cases} \tag{3}$$

여기서, U : 깃의 회전속도, λ : 깃 끝 속도비

I : 회전면에 대한 유동의 입사각

한편, 깃요소 이론과 운동량 이론에 의한 깃하중은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} C_{ib}l &= \frac{8\pi r(1-k)\sin^2 I \cdot \cos \epsilon}{(1+k)\cos(I-\epsilon)} \\ &= \frac{4\pi r(h-1)\sin(2I) \cdot \cos \epsilon}{(h+1)\sin(I-\epsilon)} \end{aligned} \tag{4}$$

여기서

C_l : 반경 r 인 위치에서 사용 에어포일의 양력계수

b : 날개의 수

l : 에어포일의 시위

ϵ : $\tan^{-1}(C_d/C_l)$

그리고, 반경방향위치 r 에서 국부동력계수는 다음과 같이 선회속도비 및 축방향 속도비의 함수로 정의된다.

$$\begin{aligned} C_p &\equiv \frac{dP_u}{\rho\pi r dr V_1^3} = \frac{\omega^2 r^2}{V_1^2} (1+k)(h-1) \\ &= \lambda^2(1+k)(h-1) \end{aligned} \tag{5}$$

축방향 속도비와 선회속도비의 관계를 구하기 위해 $G \equiv (1-k)/(1+k)$, $E \equiv (h-1)/(h+1)$ 라고 정의하고, (3)식과 (4)식을 이용하면, 다음과 같은 관계를 얻을수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{G}{E} &= \frac{(1-k)(h+1)}{(h-1)(1+k)} = \cot(I-\epsilon)\cot I \\ &= \frac{\lambda(h+1) + (1+k)\tan \epsilon}{(1+k) - \lambda(1+h)\tan \epsilon} \cdot \lambda \frac{1+h}{1+k} \end{aligned} \tag{6}$$

따라서, 축방향 속도비와 선회속도비 사이의 관계는 다음과 같다.

$$h = \frac{-\tan \epsilon + \sqrt{\tan^2 \epsilon + 2\lambda k \tan \epsilon + \lambda^2 + (1-k^2)}}{\lambda} \quad (7)$$

즉, $\frac{dC_p}{dk} = 0$ 을 만족하는 k_{opt} 값을 구하면, 최적상태의 선회속도비 및 유동각, 깃하중, 국부동력계수등이 계산되므로 깃의 성능을 해석할 수 있다.

2.2 성능해석 및 타당성 검토

풍력발전기의 동력은 다음과 같이 정의 된다

$$P = \frac{1}{2} \rho C_P (\pi R^2) V_1^3 \quad (8)$$

여기서,

C_P : 전체동력계수, R : 회전날개의 반경

또한, 전체동력계수는 (5)식의 국부동력계수를 다음과 같이 적분하여 구한다.

$$C_P = \frac{2b}{V_1 \lambda_0^2} \int_0^R C_p \lambda dl \quad (9)$$

이러한 회전날개의 동력은 결국 축방향 속도비와 선회 속도비를 구하는 것으로서 본 연구에서는 회전 속도, 풍속, 에어포일의 양항자료, 깃각분포, 시위길이의 분포등을 입력데이터로 하여^[3], 깃요소의 선회 속도비 및 축방향 속도비를 구한 다음 (5)식으로부터 국부동력계수를 구하고, 이를 적분하여 전체동력계수를 구하는 프로그램을 개발하였으며, 그 순서도는 Fig. 1과 같다. 또한 프로그램의 타당성 확인을 위해 Zond^[4] 회사의 550kW급 회전날개(Z-40FS)와 Lagerway^[5] 회사의 750kW 급 회전날개(LW-50/750)의 공력해석을 수행한 결과 회사측에서 제시한 실험 성능곡선과 잘 일치함을 확인하였으며, 축소모델을 제작하여 본 연구에서 사용한 이론으로 성능을 예측하고 공력실험을 수행한 결과 예측치와 실험치가 잘 일치함을 확인하였다.^[6]

Fig. 2와 Fig. 3은 본 연구에 의해 개발된 750kW급 풍력발전기의 풍속과 회전속도에 따른 출력

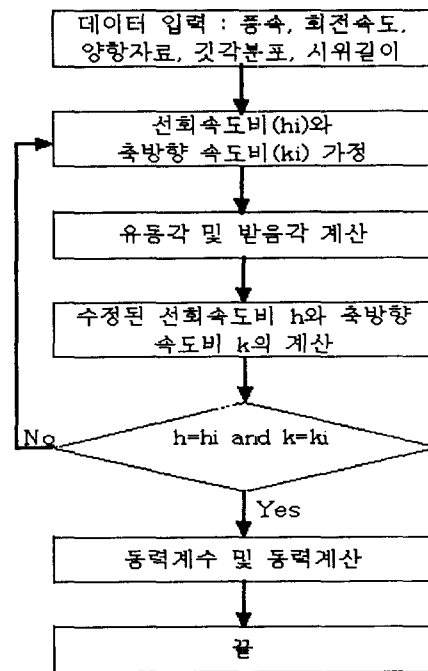


Fig. 1. Flow Chart for Aerodynamic Analysis

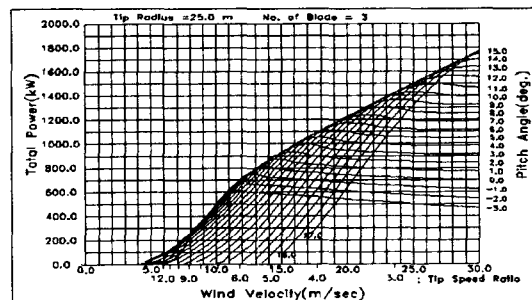


Fig. 2. Power of 750kw class HAWT Wind Speed

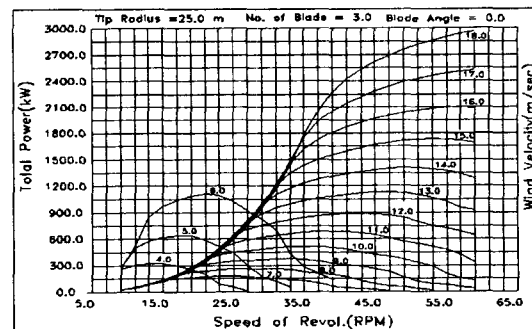


Fig. 3. Power vs. Speed of Revolution

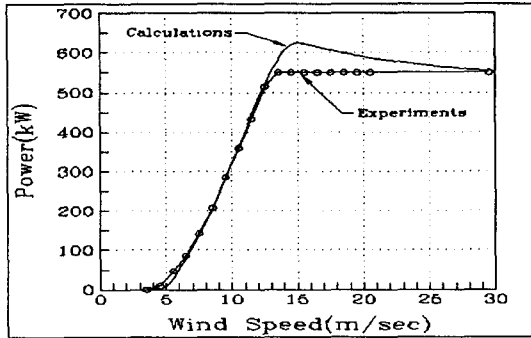


Fig. 4. Comparison of Experimental Value with Aerodynamic Analysis Result of Z-40FS

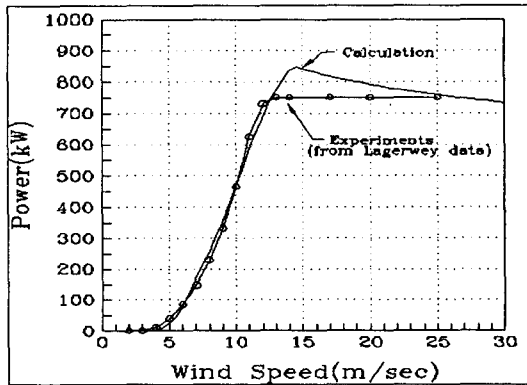


Fig. 5. Comparison of Experimental Value with Aerodynamic Analysis Result of LW 50/750

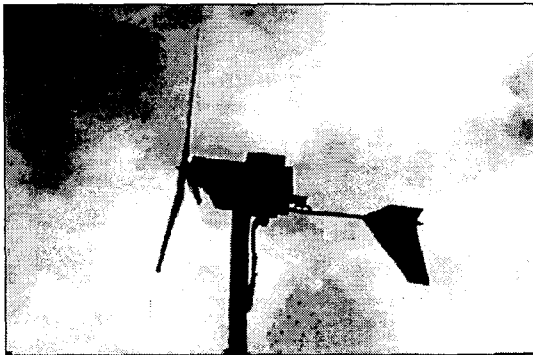


Fig. 6. Subscale test model set-up on tower

곡선이며, Fig. 4와 Fig. 5는 Zond사와 Lagerwey사의 회전날개를 개발프로그램에 의해 성능 해석한 결과와 실험치를 비교한 것이다. 비교결과 잘 일치함을 알 수 있다. Fig. 6은 공력실험에 사용된 축소모

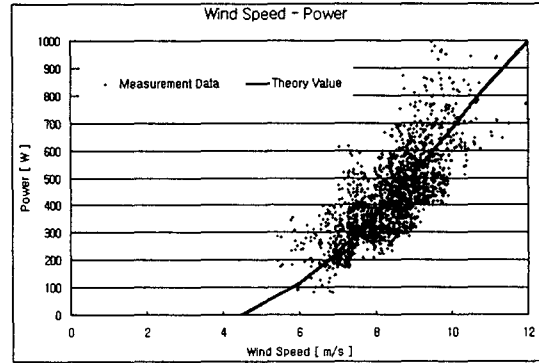


Fig. 7. Comparison Experimental Value with Aerodynamic Analysis Result of Sub-scale Model

델의 사진이며 Fig. 7은 예측치와 실험치를 비교한 것이다. 실험시 잡음등의 영향으로 실험 데이터가 넓게 분포되어 있으나 대체로 일치함을 알 수 있다.

3. 시동 특성 모사

3.1 시동 특성 해석 이론

시동시 풍차 날개에 대한 회전 운동방정식은 다음과 같이 회전토크를 관성모멘트와 각 가속도의 곱으로 표현할수 있다.

$$T = I \dot{\omega} \tag{10}$$

T : 회전날개의 공력 토크

I : 회전날개의 회전 관성 모멘트

$$(3 \times 254,221 \text{ Kg-m}^2)$$

$\dot{\omega}$: 회전 각 가속도

풍력발전기의 정지 상태에서부터 자체 회전동력에 의하여 정격 회전속도에 도달하는 시동시간을 검토하기 위해 (10)식의 운동방정식으로부터 시간에대한 것 끝 속도비와 토크, 회전수 변화등을 초기치 문제로 단순화하여 Runge-Kutta 4th order 적분 방법 이용하는 프로그램을 개발하였으며, 그 순서도는 Fig. 8과 같다.

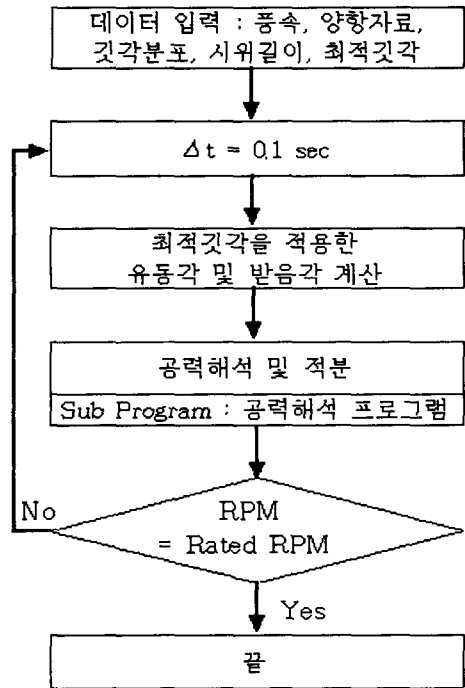


Fig. 8. Flow Chart for Starting Analysis

3.2 특정 깃각에서의 시동특성

Fig. 9와 Fig. 10은 동일 풍속 8m/s에서 깃 각이 다른 경우의 시동특성을 비교한 것으로서 최대 출력 회전속도 까지의 소요시간을 검토해 보면 깃 각이 0°인 경우 204초, 깃각이 5°인 경우 97.5초로서 시동 시간의 단축을 위해서는 깃각 제어가 필요함을 확인 하였다. Fig. 11은 최적깃각을 구하기 위하여 깃 끝 속도에 대한 깃각별 토크계수를 계산한 결과로서 각각의 깃끝속도비에 대해 최대 토크를 얻을수 있는 깃각이 존재함을 알수 있다. Fig. 12은 이러한 깃 끝 속도비에 따른 최적깃각을 나타낸다.

3.3 최적 깃 각 제어에 의한 시동특성

Fig. 13~Fig. 16는 정해진 풍속에 대해 최적 깃각으로 제어할 경우의 시동 특성을 분석한 것으로서, 3.2절에서 고려되었던, 풍속 8m/s에서의 시동시간을 검토해 보면, 고정깃각 0°인 경우의 시동시간이 204초인 것에 비해 최적깃각으로 제어하면, 42초

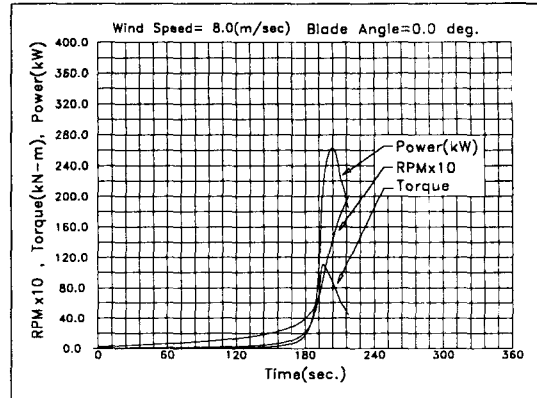


Fig. 9. Starting Characteristic of in Wind Speed 8m/s, Pitch Angle 0°

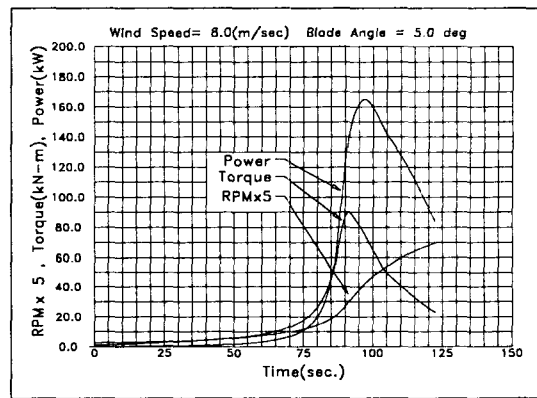


Fig. 10. Starting Characteristic in Wind Speed 8m/s, Pitch Angle 5°

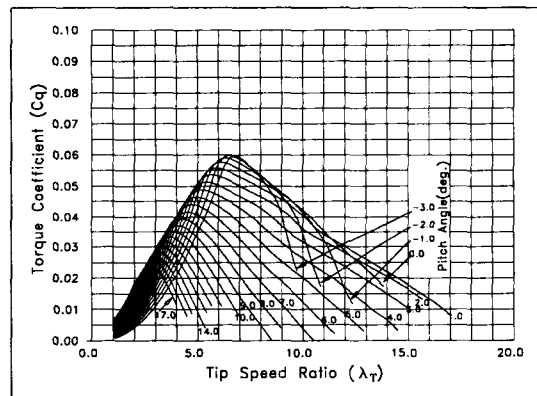


Fig. 11. Torque Coefficient as Pitch Angle for Tip Speed Ratio

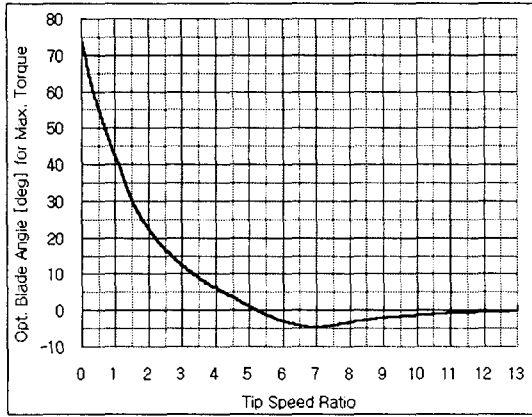


Fig. 12. Blade Angle for Max. Torque vs. Tip Speed Ratio.

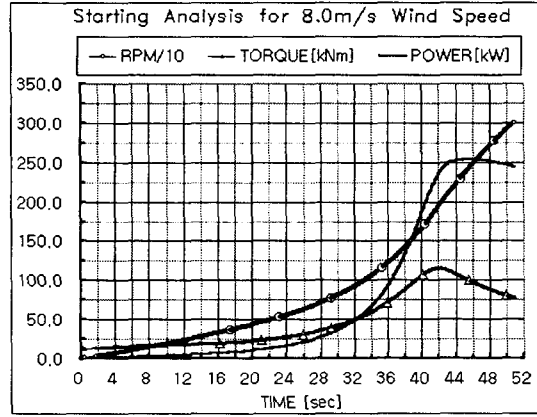


Fig. 15. Starting Characteristic in Wind Speed 8m/s

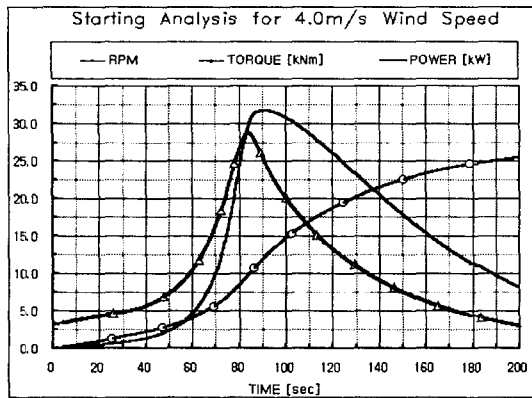


Fig. 13. Starting Characteristics in Wind Speed 4m/s

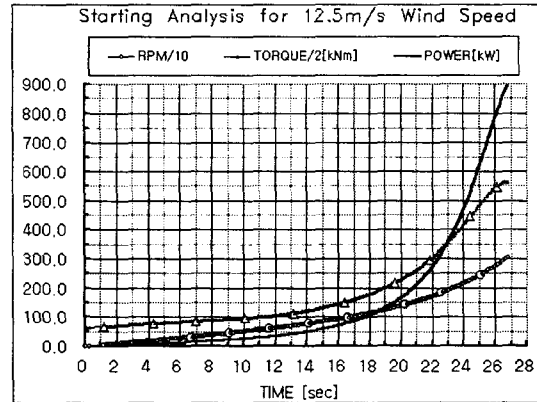


Fig. 16. Starting Characteristic in Rated Wind Speed 12.5m/s

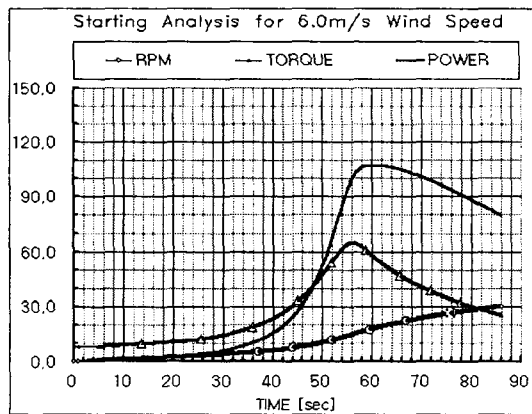


Fig. 14. Starting Characteristic of in Wind Speed 6m/s

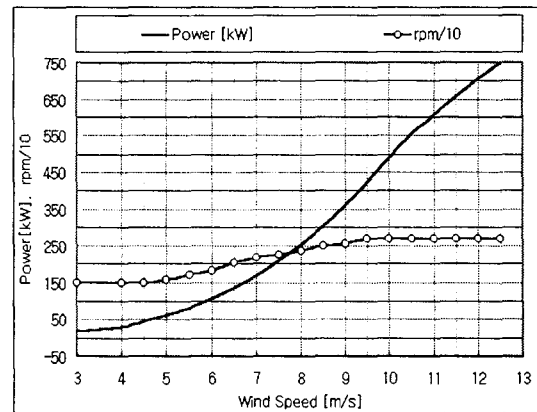


Fig. 17. RPM for Max. Power vs. Wind Speed

Table. 1

풍 속	4 m/s		6 m/s		12.5 m/s (정격풍속)	
	고정	가변	고정	가변	고정	가변
토크 [kN-m]	3	30	25.3	64.9	564	564
동 력 [kW]	8	32	79.6	103	750	750

로서 약 80%의 시동시간이 단축됨을 알수 있다. 또한, 가변회전수 발전방식으로 운용할 경우 최대토크를 갖는 회전수 상태로 발전하게 되므로 정속회전수 발전방식보다 효율적인 운용이 가능하며, 그 결과는 Table. 1과 같고, 풍속변화에 따른 최대 출력을 위한 최적 운용 회전수는 Fig. 17과 같다.

4. 결 론

본 연구를 통해 수평축 풍력발전용 회전날개에 대한 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 풍력발전용 회전날개의 공력해석 및 시동특성 해석 프로그램이 개발되었다.
2. 공력해석 프로그램의 타당성 검증을 위해 외국에서 제작 판매되고있는 회전날개의 공력해석을 수행한 결과 제작회사에서 제공한 성능 선도와 잘 일치함을 확인 하였고, 축소모델의 공력실험 결과와도 잘 일치함을 확인하였다.
3. 특정 깃각에서의 시동특성을 분석한 결과 동일 풍속 일지라도 깃각 변화에 따라 시동시간이 달라지므로 시동시 깃각제어가 필요함을 확인 하였다.
4. 개발 회전날개에 대하여 깃 끝 속도비에 따라 최대 토크를 얻을수 있는 최적깃각을 계산 하였다.

5. 최적깃각제어에 의한 시동특성을 분석한 결과 풍속에 따라 차이는 있으나 풍속 8m/s인 경우 시동시간이 약 80%정도 단축됨을 확인하였고, 풍속변화에 대해 최대 출력을 위한 최적 운용 회전수를 계산 하였다.

추후 본 연구에 의해 개발된 750kW급 수평축 풍력발전용 회전날개의 공력실험 및 운용 평가에 관한 연구가 수행될 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 에너지지원 기술개발 지원센터와 (주)한국화이바의 위탁연구용역에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

1. D. LE Gourieres, 'Wind power plants', Pergamon Press, 1982.
2. William H. Press et. al., 'Numerical Recipes', Cambridge Univ. Press, 1994.
3. 공창덕외 3인, '대용량 풍력발전 시스템용 수평축 복합재 풍력터빈 날개의 공력 및 구조설계에 관한 연구[설계결과 평가를 위한 보고서]', 1998.
4. Zond Catalogue, 'Z-40 Wind Turbine Service Information', Specifications.
5. Lagerway Catalogue, 'Specifications LW 50/750'.
6. 공창덕외 6인, '축소모델을 이용한 수평축 풍력발전 시스템용 회전날개의 공력실험에 관한 연구', 추계 한국항공우주학회 발표논문. 1998.