에너지공학 ISSN 1598-7981, 제29권 제1호(2020)
Journal of Energy Engineering, Vol. 29, No. 1, pp.34~43(2020)
https://doi.org/10.5855/ENERGY.2020.29.1.034

수직축 풍력발전용 날개의 기동력특성

김성훈†** · **김영익** · **이준민***
계명대학교 기계자동차공학전공 교수, ㈜에이엠시스템*, 대구텍**
(2019년 12월 20일 접수, 2020년 2월 10일 수정, 2020년 2월 13일 채택)

Self-Starting Characteristics of Blades for Vertical Axis Wind turbine

Sung-Hoon Kim†** · **Young-Ik Kim** · **Joon-Min Lee***
Keimyung University, Amsystem*, DaeguTech**
(Received 20 December 2019, Revised 10 February 2020, Accepted 13 February 2020)

요 약

풍력발전기 로터의 저속운전 가능성에 대해 기동토크를 평가하고자 하였다. 본 연구에서 살펴본 저속시동 가능성의 날개는 초임계에어포일을 보완하여 AMI계열(AMI903 및 AMI904)의 날개를 제안하여 공력성능을 유지하며 제작상 및 유지보수의 어려움을 제거하였다. 따라서 본 연구는 FLUENT를 이용하여 난류유동 해석을 통해 제안된 날개의 받음각(-180°~+180°)에 대한 항력계수와 양력계수를 제시하였으며, 이 값들로부터 정지하고 있는 날개의 회전 위치에 따른 접선방향의 토크계수를 정의하여 제시하였다. 기동력의 크기와 방향을 결정할 토크계수는 대부분 양의 값(반시계방향)으로 나타났으며 특별히 받음각이 0°에서 180° 및 −90°에서 −180°에서 양의 값이며 0°에서 −90°에서 매우 작거나 음의 값을 나타냈다. 한편 기동토크는 두께가 얇은 AMI903보다 두꺼운 AMI904에서 더 큰 것으로 나타났다.

주요어 : 기동토크, AMI익형, 양력 및 항력계수, 토크계수, 난류유동해석

Abstract - A study has been done for self-starting torque of vertical axis wind turbine blade. It is especially concentrated to evaluate the torque coefficient before starting rotation. Two different aerofoils(AMI903 and AMI904) are proposed to benchmark the possible best blade(supercritical airfoil) for self-starting performance. Torque coefficients in the tangential direction of rotation are given with respect to the angle of attack in terms of drag coefficient and lift coefficient. Torque coefficient shows that the effect of Reynolds number is minimal. The thicker blade(AMI904) between two different proposed airfoils has bigger torque coefficient, which is attributed to lower lift coefficient and higher drag coefficient.

Key words : self-starting torque, AMI blade, lift and drag coefficient, torque coefficient

1. 서 론

최근에 대체 에너지의 필요성과 환경오염 문제로 인해 소위 재생 가능하고 자연 친화적인 에너지 중 하나인 풍력발전에 대한 관심이 집중되고 있다. 풍력발전은 이러한 청정에너지의 한 축을 차지하고 있으며 세계적으로 연구가 활발히 추진되고 있다. 풍력발전에 핵심이 되는 기술은 풍력 터빈에 사용되는 날개의 형상을 최적화 시키는 문제이다. 풍력터빈은 크게 수평형과 수직형의 두 종류가 있는데, 이 중 수직 형은 저속에서의 시동풍속(cut-in speed)이 작기 때문에 우리나라와 같이 풍속이 작은 환경에서도 작동이 가능하다. 이에 따라 최근 익형을 사용하는 수직형 터빈에 대한 관심과 관련 연구가 활발히 진행되고 있다.

최근의 풍력발전기 연구는 날개를 선택하여 단일 날개를 받음각을 변경시키며 양력과 항력을 제시하거나, 3-4개의 날개를 동시에 해석하여 정보를 제공하고 있다. 또한 일단 정적 날개 해석이 완료

†To whom corresponding should be addressed.
Tel : 053-580-5458 E-mail: shkim@kmu.ac.kr

되면 날개를 회전시켜 회전비에 따른 동적 토크의 특성을 제공하기도 한다[1-6]. 현재 많이 사용되고 연구되는 수직형 풍력 발전기의 대부분의 날개는 NACA00XX의 좌우대칭 단면이거나 NASA계열로서 NASA4418 등이 사용되고 있다. 그러나 최근에는 기존에 사용되어 온 익형 형태가 아닌 특수한 형태의 로터에 대한 연구가 참고문헌[5,6]에 추천되어 있다.

따라서 본 연구는 풍력발전기의 로터를 날개형태로 유지하게 하고 많은 날개 형태 중 가장 적합하다고 생각되는 날개를 선택하고 이의 제작의 용이성 및 내구성을 고려한 날개를 추천하여 이에 대한 기본적인 유동 특성을 파악하고 이 특성이 기동토크에 미치는 영향을 제시하고자 한다.

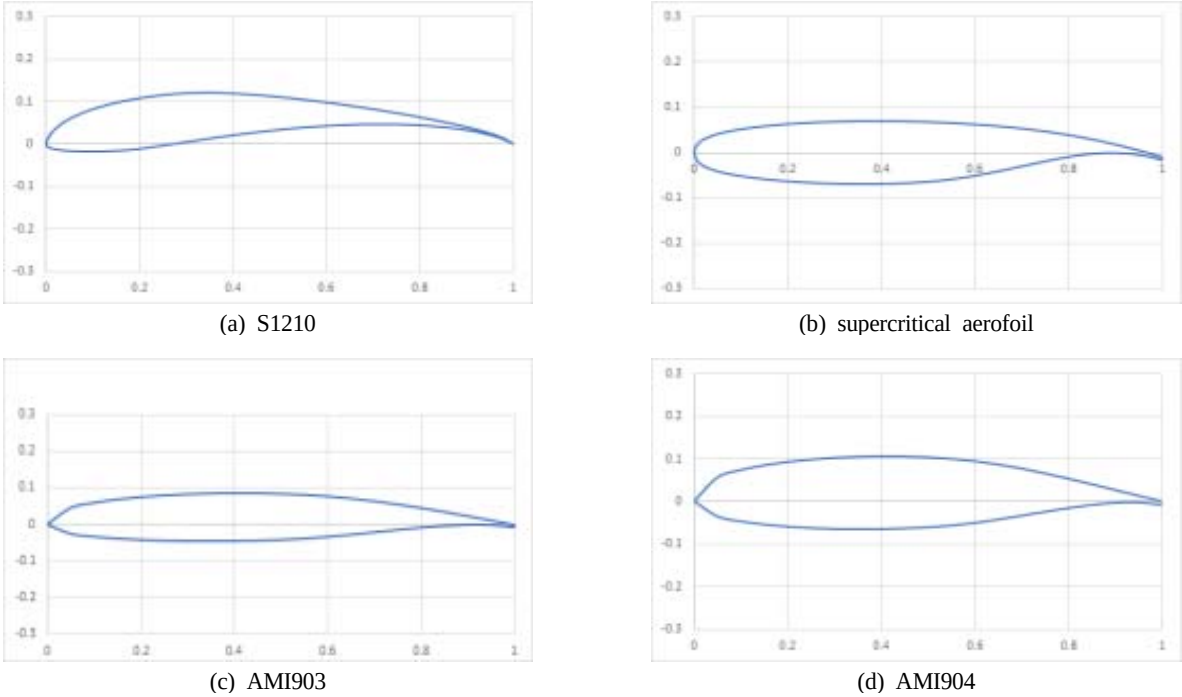
2. 본 론

2-1. 날개의 선택

날개형의 로터는 날개 주위에 형성되는 양력과 항력으로부터 토크가 발생한다. 이에 영향을 미치는 파라메터는 매우 다양하지만 회전하는 로터의 날개의 형상에 따른 압력분포, 실속과 박리 등이 큰 영향을 미친다. 특히 날개의 두께는 매우 민감한 설계요소이다. 보통 대부분 날개의 두께는 조금 두꺼울수록 좋은 성능을 보이나 너무 두꺼우면 성능이 떨어진다. 따라서 지금까지 진행되어온 날개의 두께는 NACA00XX에서 21% 두께를 넘지 않는다. 저속에서 self-starting 목적에 부합하고 좋은 성능을 유지할 수 있도록 Kircke[8]는 S1210(날개좌표는 참고문헌[10]참조)을 제안한 바 있다. 그러나 이는 두께가 12%, camber가 4.6%이며 trailing edge가 너무 예리하고 얇기 때문에 실제 작동 시 유지관리나 제작에 큰 어려움이 있다. 따라서 이의 단점을 보완하고 새로이 제안된 NASA에서 개발한 초임계에어포일(supercritical aerofoil)(두께 13.9%, camber 2.5%)[11]을 기본으로 저속용으로 AMI903(두께 13%, camber 2.2%)과 AMI904(두께 17%, camber 2.6%)의 새로운 익형을 개발하고 이들의 공기역학적 특성의 해석을 수행하고 이를 바탕으로 기동토크에 미치는 영향을 분석하고자 한다. 한편 새로운 익형에 대한 데이터는 VisualFoil 소프트웨어[12]를 가지고 구성되었다. Fig. 1은 각각 S1210, 초임계에어포일, AMI903 및 AMI904의 2차원 날개 단면 형상을 보여주고 있다.

2-2. 유동해석의 이론적 배경

유동은 날개의 self-starting 시 사용되는 레이놀즈수의 범위가 $1\text{x}10^5$~$3\text{x}10^5$이다. 본 연구에서 실제적으로 이보다 넓은 범위의 레이놀즈 수($5\text{ x}10^4$ ~ $2\text{x}10^6$) 다뤄야하므로 유동 전체는 난류로 가정하였다. 따라서 각 보존식들은 다음과 같이 표현할 수 있다.



(a) S1210 (b) supercritical aerofoil

(c) AMI903 (d) AMI904

Fig. 1. The Comparison of Sectional Shapes of Aerofoils

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial x_i}=0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j U_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left\{(\mu+\mu_t)\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)\right\} \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right]+G_k-\rho\epsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\epsilon)+\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon}\right)\frac{\partial \epsilon}{\partial x_j}\right] + C_{1\epsilon}\frac{\epsilon}{k}(G_k)-C_{2\epsilon}\rho\frac{\epsilon^2}{k} \quad (4)$$

G_k는 속도 변화에 따른 난류 운동에너지 항이다.

$$G_k = -\rho\overline{u'_i u'_j}\frac{\partial u_j}{\partial x_i} \quad (5)$$

여기서 $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}$는 상수이며 1.44, 1.92의 값을 사용하였다. 한편 난류 점성계수는 아래와 같다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (6)$$

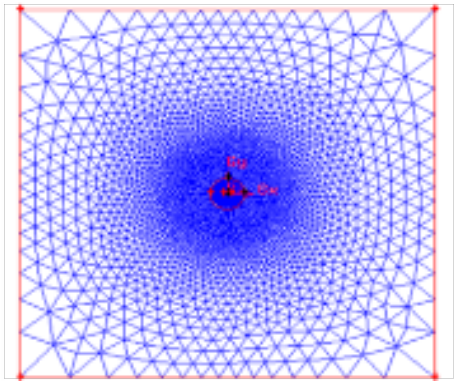
C_μ는 0.09와 σ_k, σ_ϵ는 각각 1.0, 1.3의 값을 사용하였다. k- ε 모델을 사용한 난류 유동장 해석중 벽에서는 일반적으로 광범위하게 사용되는 벽함수(Wall function) 처리방법을 사용하였다(k-ϵ 모델은 일반화되어 설명을 생략하였다). 한편 벽함수 처리 방법은 표준 벽함수 방법과 enhanced 벽함수의 2가지 방법을 사용하여 비교하였다. 같은 개념의 벽처리 방법으로서 결과에 상당한 개선을 기대하지 않으나 결과의 정량적 및 정성적 비교 목적으로 2가지 방법을 모두 시도하였다.

2-3. 수치해석의 방법

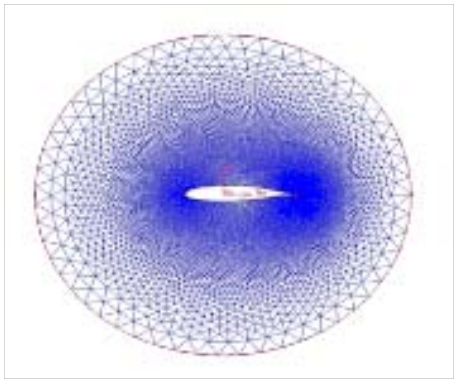
Fig. 2에는 대표적인 날개를 포함한 전체적인 해석영역을 나타내고 있다. Fig. 2(a)는 중앙부에 작은 날개를 포함하고 전체 해석영역을 충분히 크게 고려한 물리영역을 정의하여 실제경계조건을 입력하는 방법이다. Fig. 2(b)는 전체 해석영역 중 중앙부에 날개를 포함한 날개 주위의 상세한 계산영역을 다시 보여주어 전체의 경계조건은 물론 날개 주위의 상세한 유동해석을 가능토록 할 수 있다. Fig. 2(c)은 날개표면에서 해석의 정확도를 증대시키기 위해 날개표면의 경계층을 위한 사각그리드를 20개로 구성하였다. 전체 해석영역은 중앙부의 날개에 의해 상하부의 속도가 크게 변하지 않게 하여 수직방향의 기울기가 영이라는 조건(노이만 조건)을 부가하였으며, 출구 역시 노이만 조건으로 처리하였다. 입구는 속도, 난류강도(I, 5%) 등을 가지고, 각 물리량을 구하여 다음으로 입력하였다.

$$K_{in} = 1.5\mathrm{x}(\mathrm{I}\cdot \mathrm{V_{in}})^2 \quad (7)$$

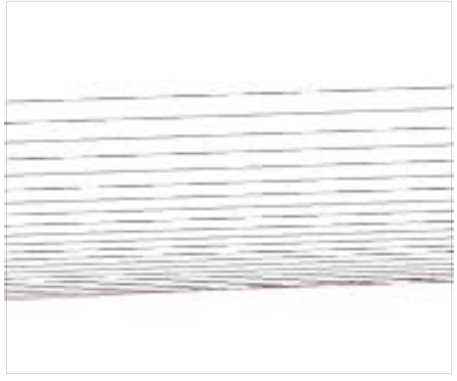
$$\epsilon_{in} = C_\mu^{3/4}\mathrm{x}\frac{\mathrm{k_{in}^{3/2}}}{l} \quad (8)$$



(a) overall domain

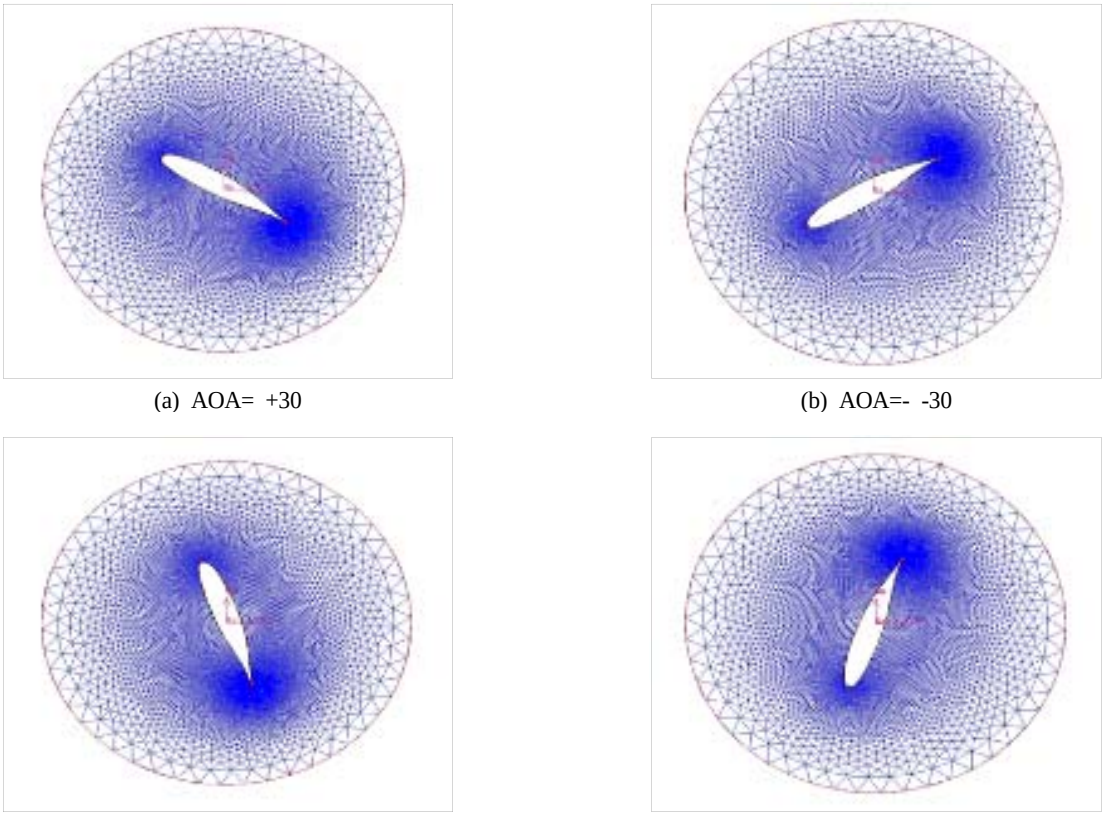


(b) centered domain in wing



(c) boundary layer grid at surface

Fig. 2. Calculation Domain and Grid System



(a) AOA= +30 (b) AOA=- -30

(c) AOA= +70 (d) AOA= -70

Fig. 3. Illustrations on Rotating Grid System including a Blade

한편 특성길이는 다음의 식으로 구하였다.

$$l = (\mathrm{L} \cdot \mathrm{t})\mathrm{x}0.05 \tag{9}$$

여기서 L은 코드길이, t는 % 단위의 두께를 의미한다. 한편 공기의 밀도는 $1.225 kg/m^3$, 점성계수는 $1.7894\mathrm{x}10^{-5} kg/m \cdot s$로 고려하였다. 위의 그림에서와 같이 계산영역은 물론 날개 주위의 그리드 및 전체 해석영역의 그리드를 구성하는 것 역시 해석결과의 정확도에 매우 중요하다. 특히 받음각의 영향을 해석하기 위해 대부분의 계산영역은 그대로 유지하는 동일 그리드시스템을 가지고 Fig. 3과 같이 날개의 받음각을 조절(회전)하여 해석을 다시 수행하였다.

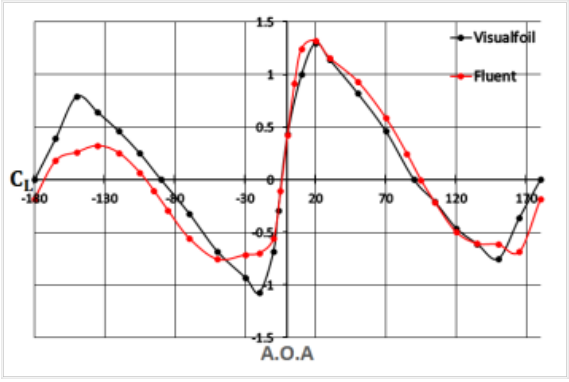
본 연구에서는 유동장 해석을 위해 유한체적법을 적용한 범용 소프트웨어인 FLUENT를 사용하였으며 대류 항은 upwind scheme, 압력 항 처리를 위해 SIMPLE 알고리즘을 사용하였다. 각 보존식의 수렴조건으로 $1\mathrm{x}10^{-5}$를 각각 적용하였으며, 동시에 연속식의 residual이 $1\mathrm{x}10^{-3}$을 만족할 경우 수렴을 선언하였다.

2-4. 수치해석의 결과의 타당성

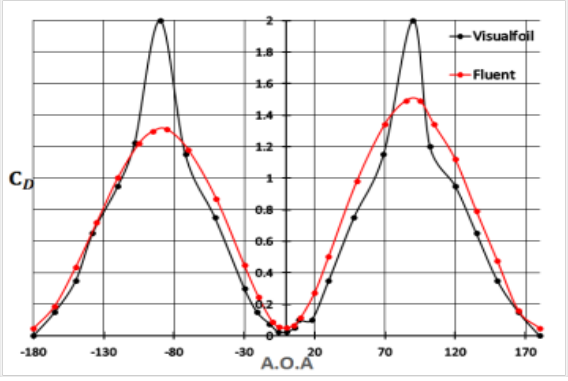
해석의 타당성을 얻기 위해 해석결과는 실험결과가 유용한 NACA0018에서 레이놀즈 수가 $6\mathrm{x}10^6$인 경우 대표적인 받음각에 따른 압력계수(C_p) 변화를 비교[9]하였다. 해석은 일반 벽함수 및 enhanced 벽함수를 이용한 난류의 경우에 대해 수행되었다. 비교 결과는 대체로 받음각이 작은 경우(-8°~19.6°) 실험결과와 상당히 근접한 일치를 보여주고 있으나, 받음각이 21.14°로 증가된 경우 압력계수에 차이가 조금씩 나타나기 시작한다. 이는 어느 정도 예상한 결과로서 받음각이 커져 박리가 나타남으로서 정확한 예측이 현재 사용한 난류 모델로서는 한계가 있을 것이라 사료된다. 본 연구에서는 난류 모델에 따른 영향분석을 배제하고 수치결과와 실험결과의 비교 결과는 전체적으로 상당히 잘 일치함으로 본 연구에 사용된 수치해석 모델 및 프로세스의 타당성은 입증되었음을 알 수 있다.

또한 새로운 익형에 대한 정량적 및 정성적 결과의 비교를 위하여 본 난류 수치해석결과와 VisualFoil의 해석결과의 상호 비교가 수행되었다. 날개는 AMI904를 택하였다(AMI903의 비교 역시 매우 비슷한 결과를 나타낸다). 받음각에 대한 양력계수

(Fig. 4(a))와 항력계수(Fig. 4(b))의 결과 비교를 제시하였다. 양력계수는 두 해석결과가 매우 유사하나 받음각이 음일 때는 차이가 나타난다. 한편 항력계수는 날개가 90° 혹은 −90°(자유유동에 수직일 경우)에서 가장 큰 차이를 나타내나 이외의 영역에서는 비슷한 분포를 보인다. 정량적으로는 전체적으로 다소 차이가 나타나나 전형적인 분포곡선은 상당히 유사하여 두 해석 방법에 타당성을 볼 수 있다. 비점성유동해석에서 항력계수는 −90°와 90°에서 항력계수가 거의 일치하고 있으나 점성유동해석은 받음각이 +90°의 항력계수가 −90°의 항력계수와 차이가 난다.



(a) lift coefficient



(b) drag coefficient

Fig. 4. Comparison of Typical Distributions of Lift and Drag Coefficients for AMI904 Blade resulted from Visualfoil and Fluent Analysis ($Re = 1x10^6$)

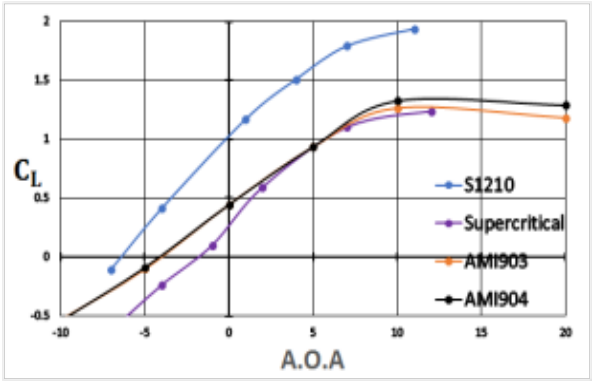
3. 결 과

3-1. 익형별 양력 및 항력계수의 비교

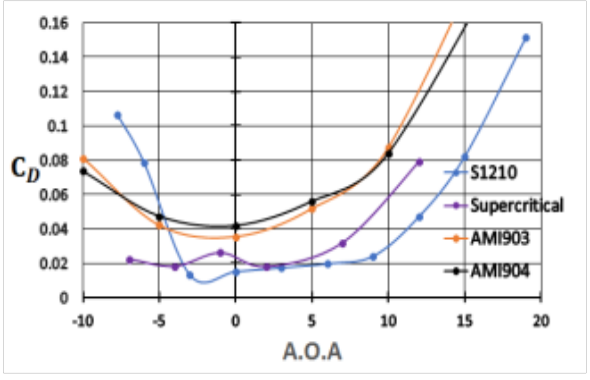
Fig. 5는 본 연구의 기준이 되는 S1210과 초임계에어포일을 포함하여 이를 보안 추천한 AMI903 및 AMI904의 양력계수와 항력계수를 비교한 것이다. 각 익형의 유효한 받음각 범위는 S1210이 −5°에서 약 20°, 초임계에어포일은 약 −5°에서 12°까지의 결과가 유용하다. 먼저 각 익형의 설계양력계수가 받음각 0°에서 각각 S1210은 $C_L = 1.0$, 초임계에어포일이 $C_L = 0.24$이며 AMI903과 AMI904의 양력계수는 $C_L = 0.4$인 것을 생각할 때 양력계수는 S1210, AMI 계열 및 초임계에어포일의 순으로 분포하는 것을 알 수 있다. 한편 초임계에어포일과 AMI903, AMI904의 양력계수의 값은 거의 같고 주어진 범위에서 받음각의 증가에 따른 증가경향은 유사하다. 한편 항력계수는 받음각이 0°에서 대부분 최소가 되며 받음각이 0°에서 벗어나며 항력은 증가한다. 전체적으로 두께가 더 한 AMI903과 AMI904의 항력계수는 S1210 혹은 초임계에어포일의 경우보다는 크다.

3-2. 양력계수와 항력계수의 분포

본 연구에서 제안된 익형(AMI903과 AMI904)에 대한 해석범위는 받음각이 −180°에서 +180°까지이며,

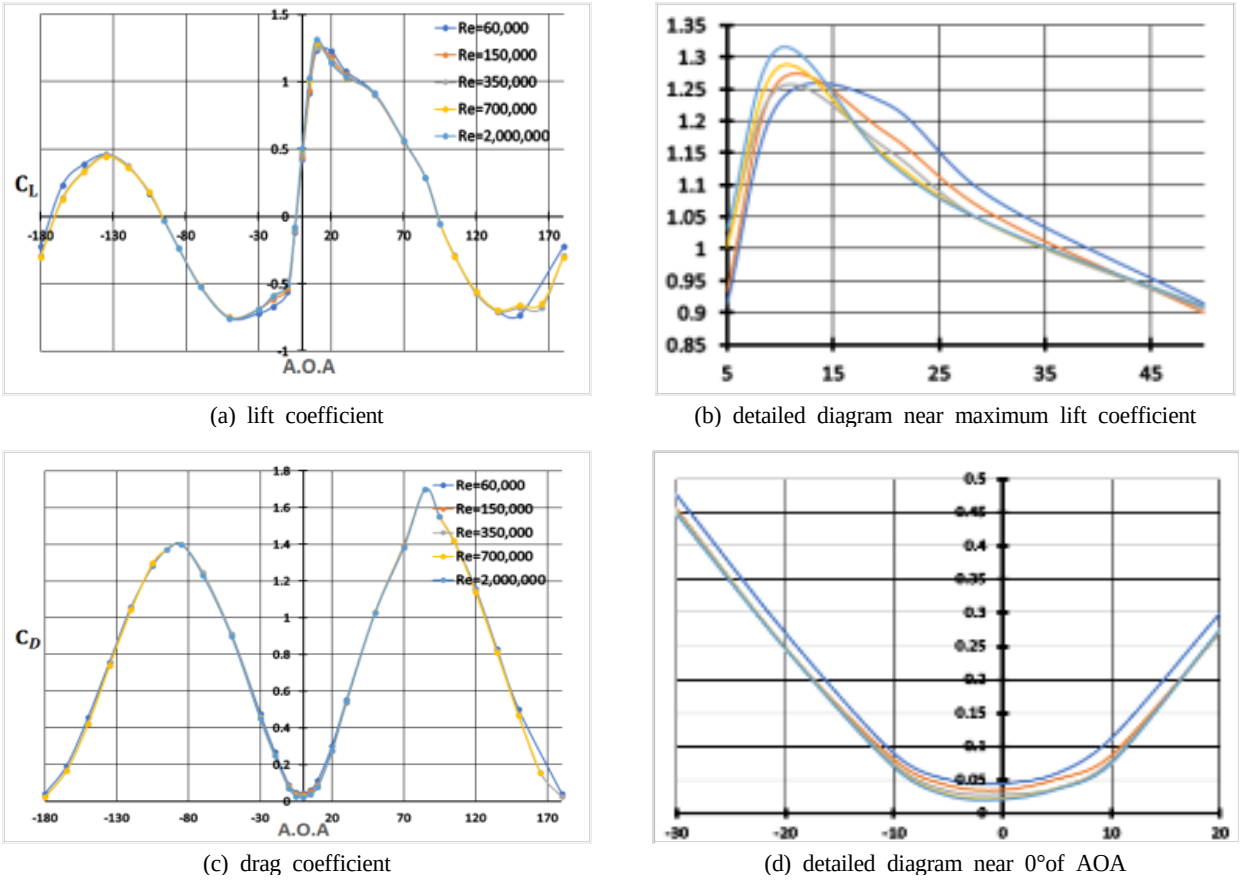


(a) lift coefficient



(b) drag coefficient

Fig. 5. Comparison of Lift and Drag coefficients as a function of angle of attack for the benchmarked S1210, Supercritical aerofoil and the revised AMI903 and AMI904 at Re=200000.



(a) lift coefficient

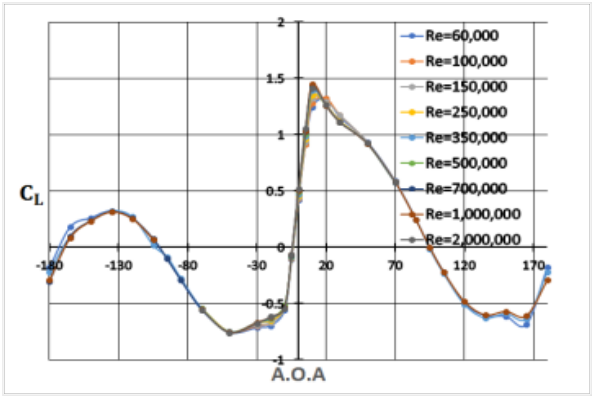
(b) detailed diagram near maximum lift coefficient

(c) drag coefficient

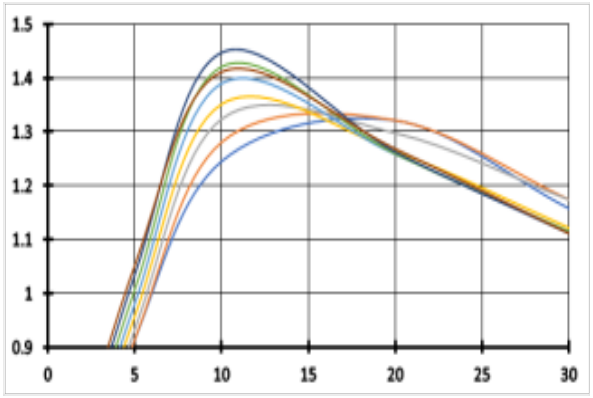
(d) detailed diagram near 0°of AOA

Fig. 6. Lift and Drag Coefficients with respect to Angle of Attack with different Reynolds numbers for AMI 903 Blade.

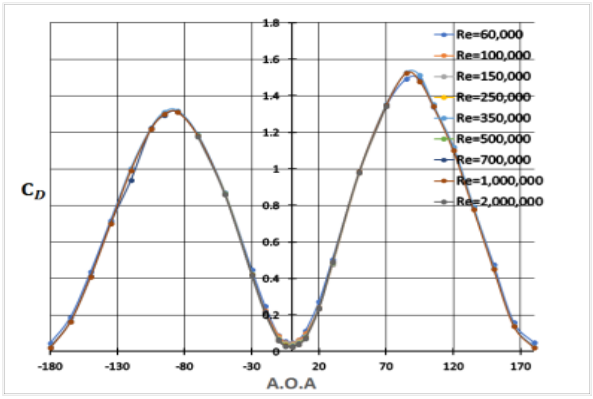
레이놀즈 수는 $6\text{x}10^4$에서 $2\text{x}10^6$까지 수행하였다. 모든 익형의 기본적인 성능 자료가 되는 항력계수와 양력계수를 받음각과 레이놀즈 수에 대해 정리한 한 해석결과를 Fig. 6(AMI903)과 Fig. 7(AMI904)에 제시하였다. AMI903(Fig. 6(a))과 AMI904(Fig. 7(a))의 날개에서 받음각에 대한 양력계수 분포는 매우 유사하며 날개 받음각에 대한 전형적인 결과를 보여주고 있다. 즉, 받음각이 0°~90°과 −90° ~-180°에서 양의 값을 보이고 이외의 받음각에서는 음의 값을 보인다. 영각이 0°에서 각각의 익형은 설계양력에서의 값(C_L=0.4)과 일치하며 영각이 ±10° 영역에서는 거의 선형적 분포를 이루나 +10° 범위를 넘으면 양력은 감소하며 이는 주어진 aerofoil의 stall영역 내의 경향이며, 이 보다 큰 받음각 범위에서는 서서히 감소하여 90° 부근에서 음의 값으로 전환하고 150°에서 최소값을 이루고 다시 약간의 증가한다. 대부분의 영역에서 레이놀즈 수에 대한 영향은 최소로 나타나나 그 중 가장 큰 영향을 미치는 영역은 받음각 10°~12° 근방에서 발생하며 Fig. 6(b)에 보듯이 레이놀즈 수가 증가할수록 최대 양력계수의 값은 조금씩 증가하며 최대 값이 발생하는 받음각은 조금씩 감소한다. 한편 항력계수는 AMI903은 Fig. 6(c), (d)와 AMI904는 Fig. 7(c), (d)에 제시하였다. 일반적으로 받음각이 0°에서 가장 작은 항력이 발생하며 받음각이 좌우로 증가할 경우 항력은 증가하여 받음각이 −90°와 90°에서 최대의 항력이 발생한다. 다시 받음각이 −180° 혹은 +180°에서 다시 항력은 다시 최소화된다. 항력계수 역시 레이놀즈 수의 영향은 적으나 그 영향이 큰 지역은 받음각 0°에서 차이가 나타난다. Fig. 6(d)와 Fig. 7(d)에 보듯이 AMI903의 경우에도 항력계수에 대한 레이놀즈 수의 영향은 상대적으로 적으나 AMI904의 경우 레이놀즈 수 영향이 커진다. 또한 레이놀즈 수가 커질수록 점차적으로 감소한다. 그러나 이는 전체 영역에 대해 일반적으로 언급할 수 있는 사항이 아니므로 영역 중 양력계수와 항력계수를 직접 비교하기 위해 Fig. 8에 2 개의 익형인 AMI903과 AMI904를 레이놀즈 수가 60000인 경우 직접적으로 비교하였다. 양력계수(Fig. 8(a))는 −180°~ −90°범위(AMI903이 더 크다) 와 0°~50°(AMI904가 더 크다), 90°~180° 범위(AMI903이 더 작다)에서 가장 큰 차이를 보이며 항력계수는 받음각이 −90°와 90° 부근에서 큰 차이를 보이고 있다(전



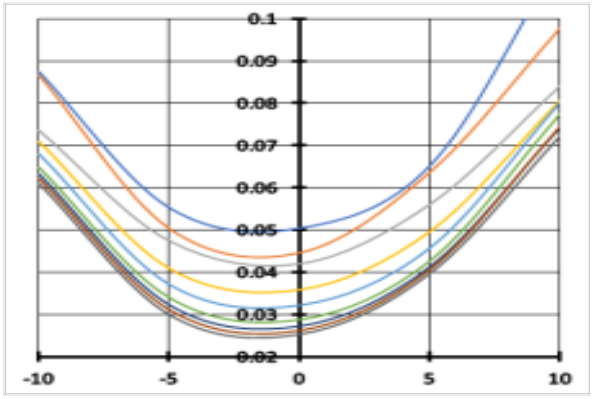
(a) lift coefficient



(b) detailed diagram near maximum lift coefficient

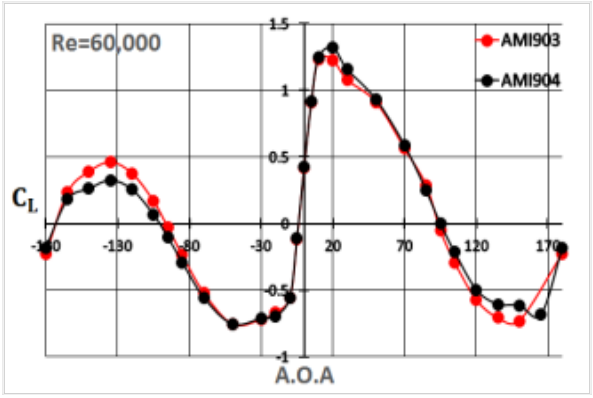


(c) drag Coefficient

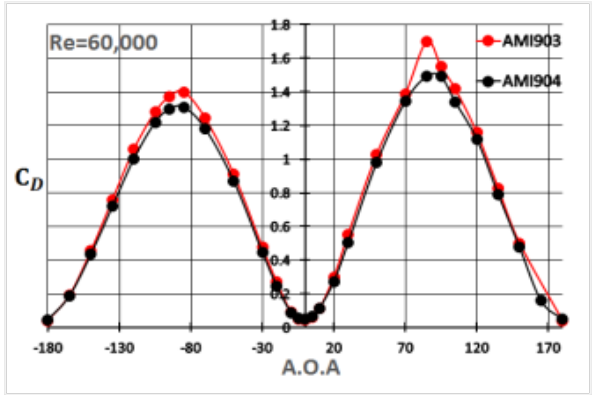


(d) detailed diagram near 0°of AOA

Fig. 7. Lift and Drag Coefficients with respect to Angle of Attack with different Reynolds numbers for AMI 904 Blade.



(a) C_L



(b) C_D

Fig. 8. Direct Comparison of Lift and Drag Coefficients for AMI903 and AMI904 at Reynolds number of **$6x10^4$**

체적으로 AMI903이 AMI904보다 크다). 이는 레이놀즈 수가 다른 경우($Re = 3.5x10^5$, $2x10^6$ 등)에도 같은 경향으로 유지됨을 확인하였다. 즉, 양력은 받음각이 +일 때 두께가 두꺼운 익형의 큰 양력을 가지나 익형이 반대로 놓인 상태(받음각=±180°)에서는 오히려 얇은 익형의 양력계수가 크다. 한편 Fig. 8(b)와 같이 항력은 받음각이 크지 않은 경우(AOA~0°부근)는 두께가 두꺼운 AMI904가 다소 커지나 받음각이 -90°와 +90° 근방에서는 얇은 두께의 익형인 AMI903이 더 큰 항력을 보인다. 이는 날카로운 익형 끝단

에서 발생하는 박리의 영향으로 사료된다.

3-3. 받음각에 따른 기동력

앞서 언급한 양력계수와 항력계수로는 회전 혹은 회전하려는 풍력터빈의 기동력에 대한 정보를 판단하기는 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서 기동력(self-starting)이라함을 정지되어 있는 로터를 움직이게 하는 토크(혹은 모멘트)라 정의한다. 회전운동을 위한 힘의 접선력을 자유유동에 대해 정의하면 식 (10)과 같다.

$$F_T = C_T \cdot \frac{1}{2}\rho U_o^2 A \tag{10}$$

여기서 C_T를 토크계수라 정의하면 토크 계수는 항력계수와 양력계수의 항으로 다음의 식 (11)처럼 정의할 수 있다.

$$C_T(\theta) = -C_D \cdot \cos(\theta) + C_L \cdot \sin(\theta) \tag{11}$$

여기서 θ는 날개의 코드(chord)가 자유유동과 이루고 있는 받음각이라 정의한다.

참고로 어느 위치에서든지 자유유동과 이루는 각에 의해 양력과 항력이 존재한다고 가정하였으며 후방에 있는 날개는 전방에 위치한 날개의 후류부의 영향을 받지 않는다고 가정하였다.

Fig. 9는 자유유동 하에 로터의 궤적(회전 시)과 자유유동의 방향에 대한 날개위치의 받음각이 정의되어 있으며, 각 날개 위치에서 식 (11)과 같이 궤적에 대한 양력계수와 항력계수의 접선성분만을 취한 결과가 토크계수이다. 따라서 토크계수를 계산하기 위한 기본적 자료는 Fig. 6의 AMI903과 Fig. 7의 AMI904의 데이터를 사용한 것이다. 참고로 토크계수가 양이면 반시계방향으로 토크를 정의된다.

Fig. 10는 AMI903 및 AMI904 얻어진 양력계수의 접선성분($C_L\sin\theta$)과 항력계수($-C_D\cos\theta$)의 접선방향 성분만 받음각에 대해 정리한 것이다. 이는 토크계수를 구성하는 각각의 양력 및 항력계수의 접선성분(토크계수)에 얼마나 기여하는지 판단할 수 있다. Fig. 10은 서로 다른 2개의 레이놀즈 수($Re = 6\text{x}10^4,\ 3.5\text{x}10^5$)에서 받음각이 변할 때 두 개의 서로 다른 익형(AMI903과 AMI904)에 대한 양력계수 접선성분과 항력계수의 접선성분의 분포를 나타낸 것이다. 먼저 레이놀즈 수에 따른 변화는 비록 국소적으로 차이가 보이긴 해도 전 영역에서 정량적, 정성적 분포가 매우 유사하여 그 영향은 최소라고 생각되며 받음각에 대해 접선성분은 4개의 영역적 특성을 보이고 있다. 약 -90°~90°의 받음각에서 양력계수의 접선성분은 양의 값(반시계방향)으로 기여하며 나머지 받음각에 대해서는 음의 값(시계방향)에 기여하여 반시계방향의 토크를 감소시킨다. 한편 항력계수의 접선성분은 양력계수의 접선성분의 경우와 반대의 받음각으로 정의될 수 있다. 두 개의 익형에 대한 접선성분에 대한 기여분의 분포는 비슷하지만 정량적으로는 차이가 존재한다. 항력계수의 기여분은 AMI903이 AMI904보다 전 영역에서 크며(즉, 절대 값이 크다), 양력계수의 기여분은 -90°~-180°와 90°~180°에서 AMI903이 AMI904보다 매우 크나 -90°~90°의 받음각에서는 오히려 조금 작게 나타난다. 따라서 정미토크계수(Net Torque Coefficient)는 구간별 특성과 그 크기가 각각 다를 것으로 추정된다.

Fig. 11은 토크계수(C_T)를 받음각 0°에서 +180° (Fig. 9의 3상한과 4상한), 받음각 0°에서 -180°(Fig. 9의 1상한과 2상한)에 대해 나타내었다. 대부분의 토크계수는 양의 방향(반시계방향)으로 나타나며 따라서 Fig. 9와 같은 날개의 정렬에서는 반시계방향으로 토크가 작동함을 알 수 있다(만약 회전한다면 이 역시 반시계방향으로 회전할 것임). 토크계수는 1상한을 제외하고 반시계방향의 토크를 생성하는데 기여하는 방향으로 작용한다. 예를 들어 1상한(받음각이 0°~-90°)과 4상한(받음각이 약 0° ~ +90°)인 영역에서 항력은 시계방향(음의 토크)으로 기여하고 큰 값의 양력은 반시계방향(양의 토크)으로 작용하여 정미토크는 양의 토크의 정미량으로 표현된다. Fig. 10에서 보듯이 1상한의 정미력은 큰 값의 양의 양력계수와 음의 항력계수의 차이로서 정미량은 상당히 크나 4상한의 경우는 양의 양력계수는 감소하고 항력계수도 감소하나 그 차이는 작아 결과적으로 토크계수는 음의 값을 갖거나 매우 작은 양의 값이

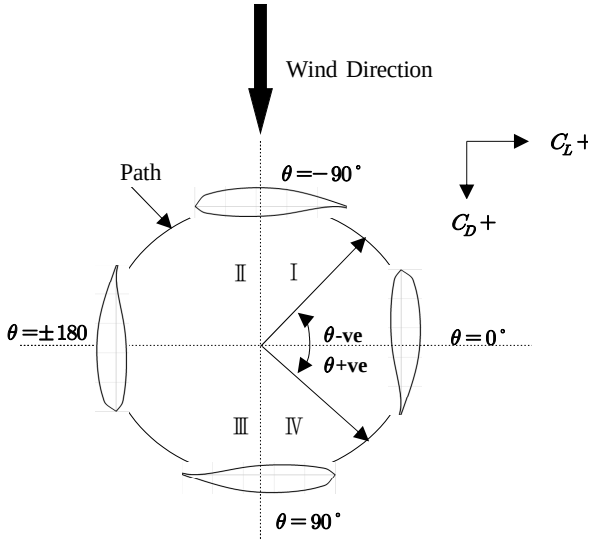
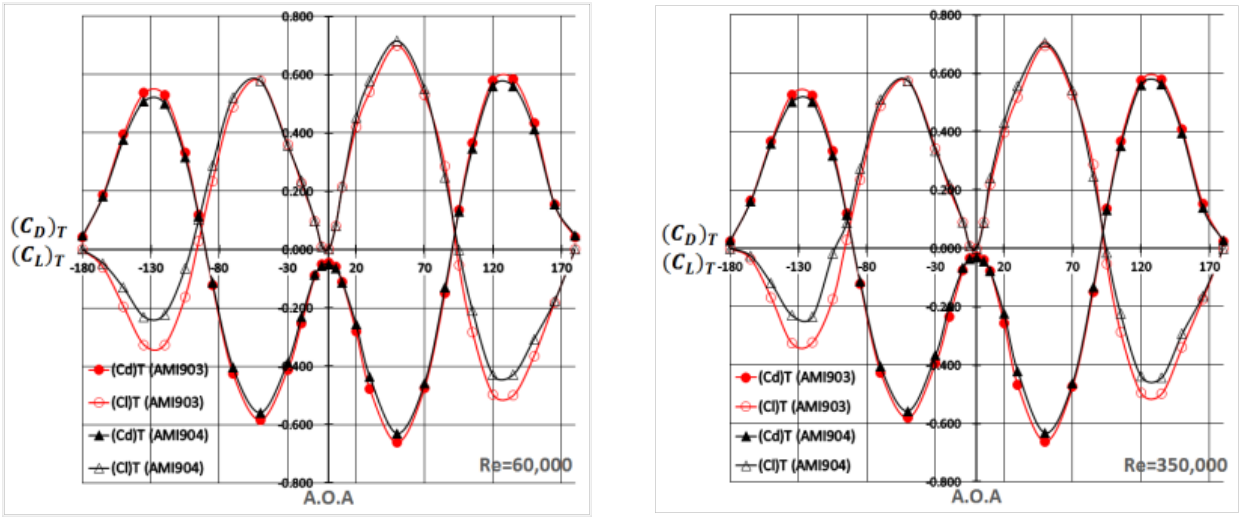
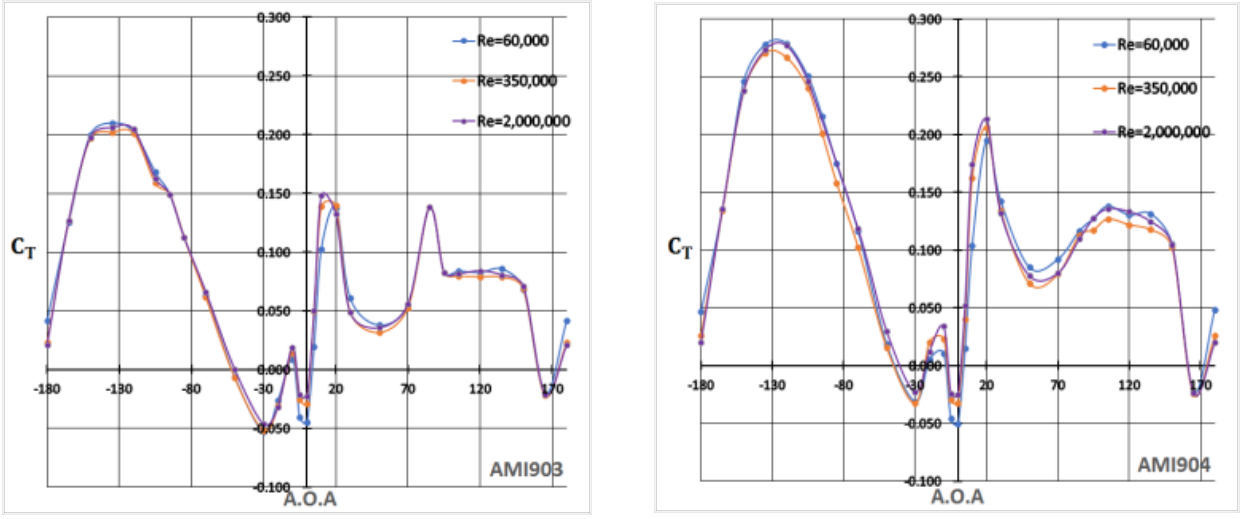


Fig. 9. Positions of Aerofoils and the related Angles of Attack under the Freestream.



(a) Re=60000 (b) Re=350000

Fig. 10. Tangential Components($-C_D \cdot \cos\theta$와 $C_L \cdot \sin\theta$) of Lift and Drag Coefficients with respect to Angle of Attack for AMI 903 and AMI904 at Reynolds Number of $6x10^4$ and $3.5x10^5$



(a) AMI903 (b) AMI904

Fig. 11. Distributions of Torque Coefficients with respect to Angle of Attack for AMI903 and AMI904 with different Reynolds Numbers ($Re = 6x10^4, 3.5x10^5, 2x10^6$)

된다. 한편 2상한(받음각이 -90°~-180°)과 3상한(받음각이 90°~180°)에서는 양의 기여분은 항력계수로부터 생성되며 음의 기여분은 양력계수로부터 생성되어 앞의 설명은 정확하게 반대가 된다. 다만 이들의 값으로 계산한 토크계수는 양의 값이며 특히 2상한에서 상당히 큰 값으로 기여함을 알 수 있다.

모든 데이터는 AMI903과 AMI904에 대해 정리되어 있으며 각 영역별 토크계수는 그대로 설명되어 질 수 있으나 정량적으로는 AMI904가 훨씬 더 크다라는 것을 알 수 있다. 이는 두께에 의한 항력과 양력에 차이가 나타나므로 이들 값의 변화가 토크계수에 영향을 미쳐 정지상태에서 기동토크에는 오히려 두께가 두꺼운 AMI904가 더 유리하다고 판단된다. 이는 앞서 언급한 두께 21%를 넘지 않는 경우 두꺼운 두께(AMI904: 17%)가 저속에서 self-starting 운전에 더 유리할 것이라는 사실을 뒷받침할 수 있다. 단, 이 비교는 두께가 주어진 두 개의 서로 다른 익형의 날개에서 정지상태의 기동토크이며 회전시의 비교는 추후 상세한 연구가 동반되어야 한다.

4. 결 론

풍력발전기용 날개에 저속운전의 기동력을 확보하기 위해 S1210을 검토하고 초임계에어포일을 기준으로 제안된 AMI903과 AMI904에 대한 기동토크를 살펴보았다. 해석은 FLUENT를 사용하여 난류유동에 대해 해석하였으며 해석결과는 기존의 실험결과와 비점성유동의 해석 결과와 비교하여 정량적이며 정성적으로 만족한 비교를 얻을 수 있었다. 새롭게 고안된 두 가지 날개에 대해 자유유동에 대해 받음각이 −180°에서 +180°까지 변하고 레이놀즈 수가 변할 때 양력계수와 항력계수의 대표적인 결과를 제시하였다. 각 날개가 회전운동을 가능게 할 기동토크을 구하기 위해 접선방향의 접선성분을 앞서 구한 항력계수와 양력계수의 항으로 토크(토크계수)로 정의하여 이를 받음각은 물론 레이놀즈 수에 대해 정리하였다. 토크계수는 받음각이 −90° ~ -180°에서 양의 값이 가장 크고 0°~180°에서도 대체로 양의 값으로 반시계방향(양의 토크)의 토크를 생성하고 있음을 알 수 있으며, 받음각이 0° ~ 90° 사이의 토크계수는 매우 작거나 음의 값을 나타내고 있다. 따라서 전체적으로 날개의 전연이 향하는 방향으로 토크가 작용함을 알 수 있다.

한편 기동력에 대한 토크계수는 레이놀즈 수에 그 영향은 크지 않으며 본 연구에서 수행한 2개의 익형에 대해서는 두께가 약간 더 두꺼운 AMI904가 더 큰 기동토크를 갖는 것으로 나타나고 있다. 따라서 AMI904가 저속운전에 더 유리한 익형임을 알 수 있다.

References

1. A. Alaimo, A. Esposito, A. Messineo, C. Orlando, and D. Tumino, 2015, “3D CFD Analysis of a Vertical Axis Wind turbine”, Energies, Vol 8., pp. 3013-3033.
2. Jee-Young Shin, Young-Seok Son, Dul-Geun Cha, Cheol-Gyun Lee, and I-Cheol Hwang, 2006, “Aerodynamic Characteristics of a Vertical Axis Wind Turbine Blades”, J. of Korean Society of Marine Engineering, Vol. 30, No. 8, pp. 877-884
3. Jung-gyun Choi, 2011, “A Numerical Study on Fluid-Structure Interaction for 100 W Class Helical Win Turbine”, thesis, Dept. of Mechanical Eng., Dong-A University
4. Ham Im, 2009, “aerodynamic Parameter Study of Rotating Air foil”, Thesis, Dept. of Aerospace and System Eng, Gyeongsang Nat. University
5. Jae-park Shim, 2013, “Experimental and CFD Analysis of V-shape Vertical axis wind turbine”, thesis, Dept. of Aerospace and System Eng. Gyeongsang Nat. University
6. Nguyen Ba Hieu, 2016, “Aerodynamic Analysis of V-Shape Vertical Axis Wind trubine”, thesis, Dept. of Aerospace and System Eng., Gyeongsang Nat. University
7. A. Qasim, R. Usubamatov, Z. Zain, and G. Quadir, 2012, “the parameters affect on power coefficient vertical axis wind turbine”, IIUM Engineering Journal, Vol. 13, No. 1, pp. 59-66
8. B. Kirke, 1998,“Evaluation of Self-Starting Vertical Axis Winf Turbines for Stand-Alone Application”, Thesis, Scholl of Eng., Griffith University
9. Sunghoon Kim, 2009, “Characteristics of Analytical Methods of airfoil with Angle of Attack”, Bull. I.I.S. keimyung university, Vol 32-1, pp. 85-90
10. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=s1210-il
11. http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=nasasc2-0714-il
12. http://www.hanleyinnovations.com/