

디지털 풍동을 활용한 풍력 발전기 날개 단면 형상 개발에 관한 연구

강덕훈* · 우영진** · 이장호***†

A Study on the Development for the Airfoil of Wind Turbine Blade using Digital Wind Tunnel

Deok Hun Kang*, Young-Jin Woo**, Jang Ho Lee***†

Key Words : Digital wind tunnel(디지털풍동), Vertical wind turbine(수직축 풍력발전기), Airfoil(익형), Wing shape(날개형상), Wind turbine blade(풍력발전기날개)

ABSTRACT

Newly updated wing shape to apply small vertical wind turbine is tested with digital wind tunnel in this study. Digital wind tunnel is designed to reduce length of wind tunnel and also to maximize its area of test section. Same DC fans of ninety six are installed in the end side of its rectangular duct and air can be blown out to the other side to have uniform flow with same electricity power. New wing is concluded using experimental plan and analysis with 4-parameters and 3-levels, and tested with digital wind tunnel. It shows better performance in lift to drag ratio, and can applied to the wind turbine for the higher torque and lower thrust.

1. 서 론

풍력 발전은 친환경적인 신재생 에너지 가운데에서도 최근 가장 활발히 연구가 이루어지고 발전 용량이 급증 하고 있는 에너지이다. 우리나라에도 대관령, 제주도 등지에 풍력 발전단지가 조성되었고 관련한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다.

풍력 발전기는 바람이 가지고 있는 운동에너지를 이용하여 전력을 생산하는 시스템으로 그 발전량은 식 (1)과 같다. 여기서 P:출력[W], C_p :출력계수, ρ :공기밀도[kg/m³], A는 단면적[m²], V:풍속[m/s]이다.

$$P = C_p \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (1)$$

식 (1)에서와 같이 풍속이 높을수록, 단면적이 클수록 그 발전량은 증가한다.

한편, 풍력 발전기는 동력 발생의 원리에 따라 양력 형과 항력 형으로 구분되어 지는데 이는 풍력발전기 날개의 형상과 관련이 있다. 항력형의 경우 바람이 날개를 미는 힘을 이용하여 날개가 회전하고, 양력형의 경우 바람이 날개를 지나가면서 날개 단면의 윗면과 아랫면에서 발생하는 압력차에 의해 힘이 발생하고 이를 이용하여 발전을 하게 된다. 항력형 보다는 양력 형 블레이드가 효율이 좋으며 일반적으로 대부분의 고효율 풍력 발전기는 양력 형을 채택하고 있다.¹⁾

양력 형 날개의 단면 형상을 익형이라 부르는데 과거 풍력 발전기에 사용되는 익형은 대부분 비행기 날개에 사용되던 익형을 적용하여 날개를 제작 하였다. 비행기에 사용되는 익형은 전 세계적으로 약 2,000여종 이상이 개발되어져 있고 현재도 비행 환경에 더 적합한 익형들이 연구되어 지고 있다. 하지만 풍력 발전기에 사용되는 익형은 이러한 항공기용 익형과는 기본 특성이 상이하야 항공기용 익형을 풍력발전기에 그대로 사용하는 것은 비효율적이다.²⁾ 따라서 풍력 발전기의 환경에 적합한 날개를 설계하기 위해서는 단면 형상에 관한 연구가 반드시 기초되어야 한다. 익형의 형상 설계는 대표적으로 역설계 기법과 수치 최적화 기법 등 이론적인 이론에 근거하여 설계되어 진다. 역설계기법은 설계자가 압력 분포를 미리 결정하여 이를 만족하는 형상을 수치적으

* 군산대학교 도시형풍력발전원천기술센터
** 군산대학교 일반대학원 기계공학과
*** 군산대학교 공과대학 기계자동차공학부
† 교신저자, E-mail : jangho@kunsan.ac.kr

로 찾아내는 방법이고, 수치최적화 기법은 임의의 함수를 최대 혹은 최소로 하는 변수를 찾는 문제를 해석하는 방법이다. 이러한 기법들은 과거에는 유동 해석의 제약으로 설계하는 방법이 제한적이었으나, 최근 solver의 기능이 개선, 향상되고 익형을 직접 설계하는 형상함수가 개발되어 최적화를 통한 익형 설계가 주를 이루고 있다.³⁾ 그러나 풍력 발전기에 사용되는 익형의 경우 바람의 시 변화 특성이 강하고 또한 그에 따르는 날개 회전방향의 속도 변화 등 익형의 특성에 영향을 줄 수 있는 변수가 존재하기 때문에 이러한 변수를 복합적으로 최적 설계하는 연구 분야가 관심을 받고 있다.⁴⁾

덴마크의 RISOE, 네덜란드의 Delft, 미국의 NREL 등 세계 각국의 연구기관에서는 풍력발전기용 고유 익형을 개발하고 있다. 우리나라에서도 2006년부터 한국에너지기술연구원에서 풍력발전기 익형 개발을 수행하였고 개발된 익형은 외국에서 연구되는 익형과는 다르게 풍속이 낮은 국내 조건을 반영하여 개발하였다.²⁾

본 논문에서는 풍력발전기 날개 단면 형상을 개발하기 위하여 기본 실험 장치인 디지털 풍동(Digital wind tunnel)을 설계 및 제작하고 2차원 익형 단면 실험을 진행 하였다. 실험에 앞서 CFD해석을 이용하여 익형 형상이 익형 성능에 미치는 영향을 분석한 뒤 해석 결과를 이용하여 기존 형상에서 형상 변화를 통하여 설계된 신규 익형을 제작하고 기존익형과의 실험 결과^{5),6)}를 비교하여 신규 익형의 성능 검증을 진행하였다.

2. 디지털 풍동(Digital wind tunnel)의 개발 및 검증

2.1. 개요

설계한 디지털 풍동은 좁은 실내 환경에 설치하여 익형 연구 개발 및 풍력 발전기 성능 실험에 사용 하도록 고려하였으며, Fig. 1의 도면과 같이 1.6m×1.55m×1.06m의 외경 크기와 1.45m×0.96m의 시험부를 갖도록 설계하였고 사각 덕트의 한쪽 측면에 96개의 고유량 DC Fan을 장착 하였다.

일반적으로 사용하는 DC Fan의 경우 유량이 20~90 CFM인데 반해 장착한 DC Fan은 유량이 145 CFM이다. 보다 상세한 DC Fan의 제원은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of DC fan

separation (unit)	spec
rated voltages (VOLTS)	48
input currents (AMP)	0.4
rotational speed (RPM)	2900±10%
max. flow (CFM)	145±10%

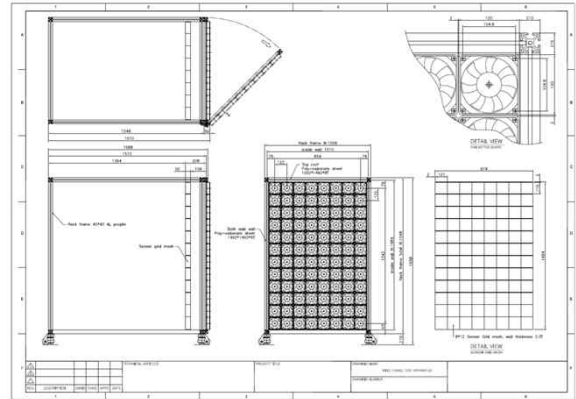


Fig. 1 Design drawing of digital wind tunnel

제작한 풍동은 토출형식으로 외형은 알루미늄 프로파일과 PC(PolyCarbonate)로 외형을 제작 하였고 이동과 고정을 간편하게 하기 위하여 하부에 높낮이 조절용 캐스터가 있는 이동식 바퀴를 장착하였다. 또한 설계 및 제작의 간편성과 비용 및 장소의 경제성을 고려하여 다른 풍동과는 달리 확산부, 정제실 등이 구분되어있지 않고 고유량의 DC Fan에서 발생하는 유동이 바로 시험부로 이어지고 유동이 재순환하지 않고 밖으로 배출되는 개회로 형식의 풍동이다.

2.2. 유동 측정

제작한 풍동의 유동 분포를 측정하기 위하여 Hot wire anemometer(HHF2005HW,OMEGA)를 이용하여 시험부의 풍속을 측정 하였다. 풍속 분포는 시험부 단면에 측정 지점을 설정하고 각 측정 점에서 풍속을 측정 하였으며 측정된 풍속을 이용하여 시험부에서의 평균풍속(\bar{u})과 표준편차(σ), 난류강도를 산출하였고 산출 식은 식(2), 식(3)과 같다.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n u_k^2}{n} - \bar{u}^2} \quad (2)$$

$$T.I = \frac{\sqrt{(\bar{u}')^2}}{\bar{u}} = \frac{\sqrt{(u - \bar{u})^2}}{\bar{u}} \quad (3)$$

풍속 측정은 실험 모델이 거치되는 시험부 단면에서 77개의 풍속 측정 포인트를 설정하여 측정된 결과를 가지고 시험부 단면에서의 평균풍속, 난류강도를 산출 하였다. 풍속 측정 결과는 Table 2와 같으며 평균 풍속은 4.56 m/s, 난류 강도는 3.83%이다.

Table 2 Summary of velocity measurement with position

x \ y	12	24	36	48	60	72	84
12	4.50	4.47	4.53	4.45	4.43	4.27	4.32
24	4.39	4.59	4.70	4.72	4.72	4.48	4.38
36	4.51	4.72	4.79	4.76	4.77	4.49	4.37
48	4.50	4.72	4.83	4.84	4.77	4.57	4.31
60	4.43	4.57	4.74	4.86	4.82	4.71	4.29
72	4.39	4.49	4.78	4.83	4.83	4.72	4.31
84	4.41	4.48	4.79	4.80	4.82	4.71	4.35
96	4.37	4.49	4.69	4.81	4.82	4.74	4.49
108	4.36	4.50	4.66	4.74	4.82	4.74	4.53
120	4.20	4.34	4.53	4.72	4.76	4.63	4.39
132	4.13	4.18	4.31	4.50	4.46	4.31	4.19

2.3 검증 실험

2.3.1. 실험 조건

풍동 내부의 유속은 평균풍속 4.56 m/s, 난류강도 3.8 %의 자체 제작된 digital wind tunnel에서 실험이 진행 되었으며 실험 모델은 NACA0012이다. 모델 제작은 풍동의 blockage effect를 최소화하기 위하여 시위 길이는 0.1 m, 세로 길이는 1.45 m로 하였다.

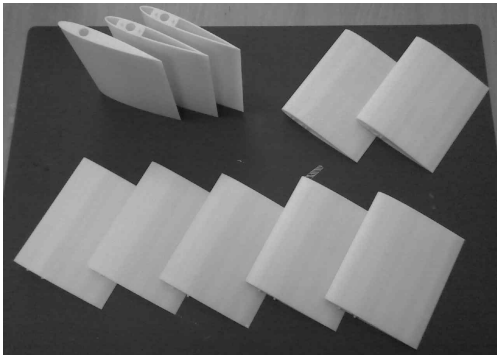


Fig. 2 Test model assembled with 10 segments

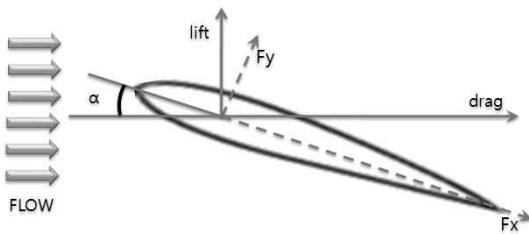


Fig. 3 Coordinates of test condition

Table 3 Accuracy of measurement

2-axis load cell	CMAS110-1L (max load : 10N)	± 0.5 % (nonlinearity) ± 0.5 % (hysteresis)
DATA acquisition	Agilent 34970A	
Dynamic Strain Amplifier	SST-200S	gain : ×1000 (err : ±1 %) stability : 2 uV/°C

2.3.2. 실험 방법

모델은 3D Printer(uPrint)를 이용하여 1 조각에 145 mm 씩 총 10 조각으로 나눠 Fig.2와 같이 제작한 뒤 조립하여 하였으며 재질은 ABS이다. 계측에 사용된 장비는 Table 3에 정리 하였다. 2-axis load cell (CMAS110-1L)은 출력 값의 비선형성과 이력(履歷)현상은 ±0.5 %이다. Fig. 3에서 Fx, Fy의 분력을 측정하고 이를 식(4), 식(5)와 같이 사상 변환하여 양력과 항력을 도출 하였다. 받음각은 0~24 °반시계 (CCW) 방향으로 회전시켜 측정값을 1 초에 10 개씩 10 분간 총 6000 개의 값을 측정한 뒤 평균한 값을 사용하였다. Fig. 4에 실험 개략도를 도시하였다.

$$LIFT = F_y \cos \alpha - F_x \sin \alpha \quad (4)$$

$$DRAG = F_y \sin \alpha + F_x \cos \alpha \quad (5)$$

2.3.3. 실험 결과

측정된 양력 항력으로부터 식(6), 식(7)을 이용하여 양력 계수(C_L)과 항력계수(C_D)를 받음각별로 비교하였으며 실험 조건에 대한 비교는 식(8)을 이용한 레이놀즈 수와 난류강도가 비슷한 기존 실험 데이터를 가지고 비교하였다.

$$C_L = \frac{Lift}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (6)$$

$$C_D = \frac{Drag}{\frac{1}{2} \rho A V^2} \quad (7)$$

$$Re = \frac{\rho VL}{\mu} \quad (8)$$

여기서 ρ는 공기밀도(kg/m³), A는 단면적(m²), V는 풍속 (m/s), μ는 점성계수(kg/m · sec), L은 시위길이(m)이다. 여기서 공기 밀도는 표준 공기 밀도 값인 1.225 kg/m³을 이용하여 양력계수, 항력계수를 계산하였다.

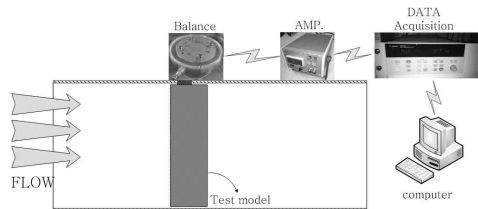


Fig. 4 Schematic diagram of experiment

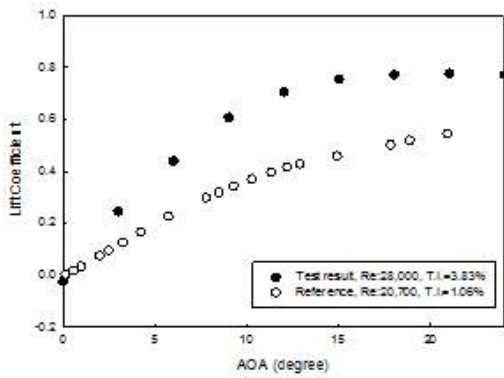


Fig. 5 Lift coefficients of reference and test mode

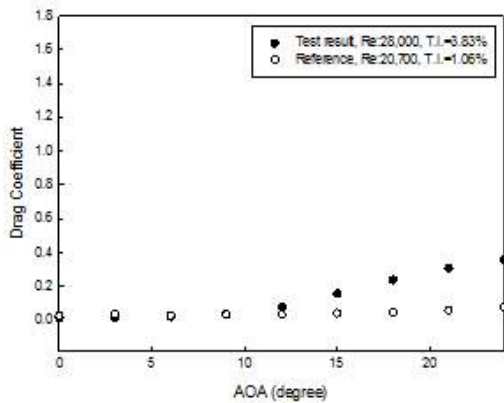


Fig. 6 Drag coefficients of reference and test model

실험 결과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 받음각이 증가할수록 양력 계수는 계속 증가하다가 일정각도에 이르러 더 이상 증가하지 않는다. Fig.6과 같이 항력계수는 받음각이 증가함에 따라 약간의 증가를 보이다 일정각도에서 크게 증가하고 그 이후 계속 증가함을 보이고 있다. 이러한 현상은 난류강도가 높아 실속각에서 양력이 급격히 감소하지 않고 최대 양력 값 전후로 완만한 곡선을 보여주는 기존의 연구 결과와 비슷한 경향을 보여주고 있다.^{5),6)}

3. 신규 익형의 연구 개발

3.1. 익형 설계 방법

3.1.1 CFD 해석 조건

익형을 해석하기 위한 상용코드로 범용 열, 유체를 해석하는 SC/Tetra를 사용하였다. SC/Tetra는 GUI기반 코드로 유한 체적법(FVM, Finite Volume, Method)을 사용하여 해석한다. 프로그램 자체 격자(Tetra)를 생성하기 때문에 mesh 생성작업이 다른 프로그램보다 효과적이다.

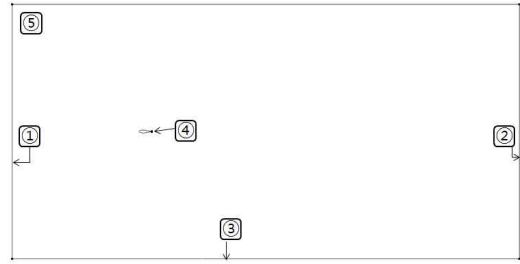


Fig. 7 Boundary condition

Table 4 Boundary condition

No.	Name	Condition	Note
①	in let	4.48m/s	Re=30,000
②	out let	Natural outflow	-
③	wall	free slip wall	-
④	wing section	stationery wall	chord length=0.1 m
⑤	volume condition	Static Analysis turbulence model: MP k-ε 2000 cycle Convergence level : 10 ⁻⁴	

익형의 2D 해석을 진행하기 위해 Fig. 7과 같은 검사체적에 Table 4와 같은 조건으로 해석을 진행하였다. 검사 체적의 크기는 익형의 시위길이 0.1m의 전방 부 10배, 후방 부 30배, 상하 각각 15배이며 폭 0.01m로 하였다. 한 과정 당 100회 반복하여 10⁻⁴의 수렴 조건으로 최대 2000회 해석하였다. 난류모델은 비교적 레이놀즈수가 적고 구조가 간단한 해석에 주로 사용되는 Standard k 모델의 개선형태인 MP K-ε 모델을 이용하였다. 입구조건은 실험과의 비교를 위하여 레이놀즈수가 30,000이 되도록 4.48 m/s의 속도를, 출구조건은 자연적인 흐름 상태인 Natural outflow 조건을 부여하였다. 검사체적의 벽에는 free slip wall조건을 부여하였고, 익형 표면은 stationery wall 조건을 설정하였다. 해석에 사용된 유체는 표준공기의 물성치인 밀도 1.225 kg/m³, 점성계수 1.83×10⁻⁵ N·s/m²으로 설정 하였다.

해석 익형의 받음각을 0°~21°까지 3°간격으로 해석을 진행하였다.

3.1.2 신규 익형의 설계법

본 논문에서는 Fig. 8과 같은 기준 익형의 중요 형상 인자인 앞전반지름, 최대 두께 위치, 최대 캠버의 위치, 캠버 크기가 변할 때 익형의 성능을 분석한 뒤 이를 바탕으로 신규 익형을 설계하였다.

형상인자 4가지 요소의 변경 수준을 Table 5와 같이 3가지 수준으로 변경할 경우 총 81가지의 경우의 수가 나오게 된다.

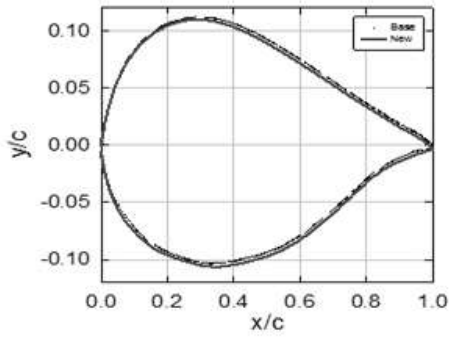


Fig. 8 Base shape and new shape

시간과 비용의 절감을 위하여 실험요소 설계기법의 다구치 직교 배열 표를 작성하여 통계프로그램인 Mini tab 14.1을 사용하여 조합을 정리하면 9가지의 경우로 줄어들게 된다. 해석을 수행할 조합은 Table 6과 같으며 해석 결과에서 양력계수와 항력 계수를 도출한 뒤 각 케이스별 공력계수의 증감을 분석 하였다.

양력계수의 경우 높을수록 좋은 결과 이므로 망대 특성으로, 항력계수의 경우 낮을수록 좋으므로 망소 특성으로 각각 분석하여 앞전반지름, 최대 두께 위치, 최대 캠버의 위치, 캠버 크기를 결정한 뒤 기존 익형과 다른 신규 익형을 Fig. 8과 같이 설계하였다.

새로 설계된 익형은 기존 익형의 형상에서 최대 두께 위치가 앞전 쪽으로 8%이동, 최대 캠버의 크기가 10% 증가되어진 형상이다.

Table 5 Summary of key 4-parameters and 3-levels

설계인자	수준 (chord length 0.1m)		
앞전반지름 크기 (A)	r/c 0.01575	20% 축소	40% 축소
최대두께 위치 (B)	Xtmax/c 36%	4%이동(LE)	8%이동(LE)
최대캠버 위치 (C)	Xcmax/c 16.7%	4%이동(TE)	8%이동(TE)
최대캠버 크기 (D)	Fc 1.6%	10% 확대	10% 축소

Table 6 Experimental plan with orthogonal array of L9-3⁴

직교 배열 표(L9-3 ⁴)				
case	leading edge	최대두께	캠버위치	캠버크기
1	base	base	base	base
2	base	4%	4%	10%
3	base	8%	8%	-10%
4	20%	base	4%	-10%
5	20%	4%	8%	base
6	20%	8%	base	10%
7	40%	base	8%	10%
8	40%	4%	base	-10%
9	40%	8%	4%	base

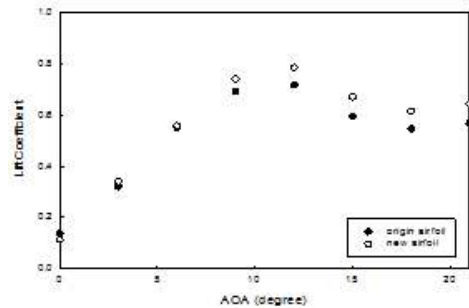
3.2 디지털 풍동을 이용한 개발 익형의 검증 실험

3.2.1 실험 방법

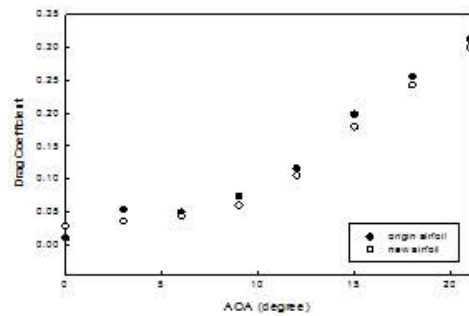
모델 제작은 앞에서 실시한 NACA0012와 같은 방법으로 3D Printer를 이용하여 ABS로 제작하였으며 레이놀즈수는 28,800이다. 받음각 0~21°에 대한 실험 진행 뒤 양력계수, 항력계수, 양항비를 도출하여 기존 결과 대비 신규 익형의 성능을 비교 하였다.

3.2.2 실험 결과

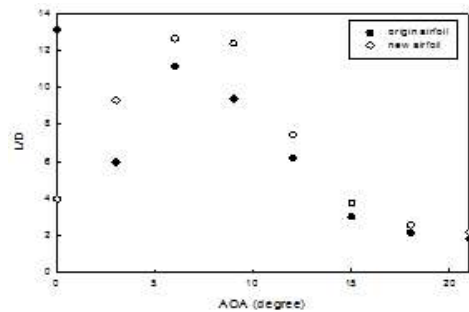
Fig.9에서 기존의 익형과 신규 익형의 실험 결과를 비교 하였다. 0°~21°받음각 범위 내에서 양력계수는 기존익형대비 신규 익형이 평균 약 8% 증가, 항력 계수는 약 16% 감소하여 양항비가 약 20% 증가하였다.



(a)

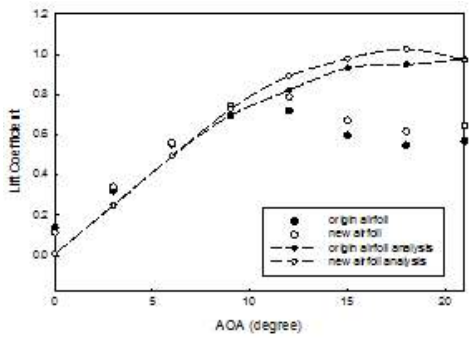


(b)

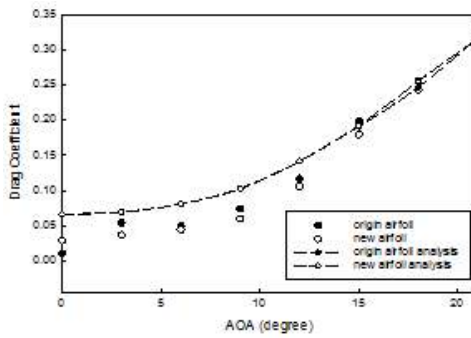


(c)

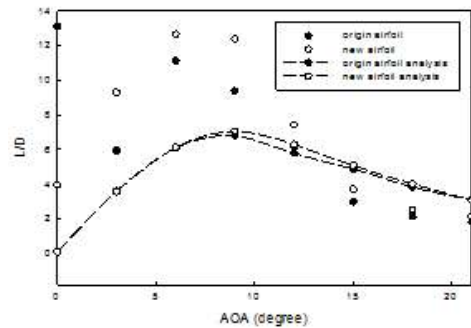
Fig. 9 Test results of new and base airfoils: (a) lift, (b) drag, (c) lift to drag ratio



(a)



(b)



(c)

Fig. 10 Compare to analysis results with test results ; (a) lift, (b) darg, (c) lift to drag ratio

Fig. 10에 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 실험 결과에서는 실속 받음각 이전 영역에서 해석 결과와 비슷한 경향을 보이나 실속 받음각에서 해석과는 달리 실험에서는 양력 계수의 감소가 나타나는 경향을 보였고 항력 계수의 값은 실험결과와 해석 결과가 비슷한 경향을 보였다.

4. 결 론

풍력발전기 날개 단면 형상 개발을 위하여 digital wind tunnel을 제작하였으며 제작한 풍동은 기존 풍동과는 다르게 좁은 입지에서 경제적으로 풍력 터빈 블레이드의 익형 개발에 사용될 수 있음을 확인하였다. 제작한 풍동의 평균 풍

속은 4.5m/s, 난류강도는 3.8%로 난류 강도가 높은 곳에서 작동하는 풍력 블레이드의 익형 시험에 적합한 것으로 나타났다. 난류강도는 시험부 전단의 정류망을 교체함으로써 일정부분 조정 된다.

제작한 풍동에서 NACA0012에 대한 검증 실험을 수행한 결과 기존의 시험 결과와 유사한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 기존 형상에서 주요 인자가 변경 되었을 때 공력 성능에 미치는 영향을 다구치 실험 계획법을 이용하여 분석하는 방법으로 신규 익형을 설계하였다. 신규 익형의 실험 결과양력계수는 기존 대비 평균 8% 증가하고 항력계수는 기존대비 평균 16% 감소하였으며 양항비가 기존대비 20% 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구에서 사용된 디지털 풍동과 실험계획법이 신규익형을 개발하는 하나의 방법으로 될 수 있음을 확인하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 것입니다 (No. 20123021020010).

참고문헌

- (1) 전중환, 2006, “풍력 발전 기술 소개,” 물리학과 첨단기술, June, pp. 50~54.
- (2) 김석우, 신형기, 장문석, 2007.9, “Wind Turbine Airfoils considering Surface Roughness Effects,” 신재생에너지 학회 춘계 학술대회, Vol. 3, No. 3, pp. 36~44.
- (3) Kristian S. Dahl, Peter Fuglsang, 1998, “Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISO-A-XX,” Riso-R-1024(EN), Riso National Laboratory, Denmark, 1998.
- (4) Christian Bak, Peter Fuglsang, Niels N. Sorensen, Helge, 1999, “Airfoil Characteristics for Wind Turbines,” Riso-R-1065(EN), Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1999.
- (5) E. V. Laitone, 1997, “Wind Tunnel tests of wings at Reynolds numbers 70000,” Experiments in Fluids 23 405-409.
- (6) Ph. Devinant, T. Laverne, J. Hureau, 2002, “Experimental study of wind-turbine airfoil aerodynamics in high turbulence,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 689~707.
- (7) Nishi, H. Miyagi, 1995, “Computer-controlled wind tunnel for wind-engineering applications,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 54/55, pp. 493~504.
- (8) Shuyang Cao, Akira Nishi, Hironori Kikugawa, Yuji Matsuda, 2002, “Reproduction of wind velocity history in a multiple fan wind tunnel,” Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90, pp. 1719~1729.