한국마린엔지니어링학회지 제35권 제4호, pp. 475~482, 2011. 5 (ISSN 1226-9549)
Journal of the Korean Society of Marine Engineering

Groove를 활용한 풍력블레이드 성능향상을 위한 수치적 연구

홍철현[1] · 서성호†

(원고접수일 : 2011년 4월 26일, 원고수정일 : 2011년 5월 16일, 심사완료일 : 2011년 5월 24일)

Numerical Analysis on Performance Improvement for Wind Blade by the Groove

Cheol-Hyun Hong[1] · Seong-Ho Seo†

요 약: 본 연구는 풍력블레이드의 공력특성 향상을 위한 기초연구로서, 익형의 표면에 형성된 groove의 형상에 따른 양항비의 개선정도를 전산해석을 통해 분석하였다. 본 연구의 계산 범위에서 경계층(δ)과 groove 깊이(h)의 비는 1.1, groove 깊이(h)와 폭(d)의 비는 0.1, groove 사이의 거리(p)와 폭(d)의 비는 1.2, groove 수는 2개의 경우에서 양항비가 8.7% 향상된 결과를 보였다. Groove에 의한 양항비의 개선정도가 특정 받음각 이후에서도 지속됨을 확인하였다.
주제어: 풍력 터빈, 블레이드 설계, 전산해석, Groove, NACA0015

Abstract: This study, a basic study to improve aerodynamic characteristic of a wind blade, explored through CFD how much the lift to drag ratio improves according to the shape of groove formed on the surface of airfoil NACA0015. This study found out that the ratio improves by 8.7% when the ratio between boundary layer(δ) and the depth of groove(h), the ratio between the depth of groove(h) and the width of groove(d) and the ratio between the length(p) from one groove to the other and the width of groove are 1.1, 0.1 and 1.2 respectively. The number of grooves is two. It was also confirmed that the improvement of the lift to drag ratio is maintained after certain angle of attack.
Key words: Wind turbine, Blade design, CFD, Groove, NACA0015

1. 서 론

신 재생에너지 생산에 대한 전반적인 관심 속에 풍력 터빈 시스템에 대한 연구 및 개발이 활발히 이뤄지고 있다. 풍력 터빈 시스템은 블레이드를 통해 공기가 가지는 운동에너지를 전기에너지로 전환하기 때문에 블레이드의 공력특성이 전체 시스템의 발전 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서 풍력 터빈 시스템의 설계 단계에서 블레이드는 실험이나 해석을 통해 공력특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다. 하지만 풍력 터빈 블레이드는 스팬 길이가 수 십 미터(m)에 이르기 때문에 풍동 실험이 거의 불가능하다. 따라서 전산해석을 통해 실험을 대신하는 방법으로 블레이드의 공력특성을 해석하는 것이 일반적이다[1].

공기역학적 최적 설계를 요구하는 대부분의 풍력발전용 블레이드는 효율증대 및 성능향상을 위해 1차적으로 블레이드 주변 유동장의 특성을 명확하게 규명할 필요성과, 블레이드의 공력특성을 고려한 형상 최적설계인자의 도출을 위해서는 신뢰성 있는 실험을 통한 방대한 유동특성 및 성능측정 결과의 확보가 요구되나, 많은 비용과 시간이 소요되는 문제로 인해 현실적으로 고려될 수 없으므로 후

† 교신저자(한국과학기술정보연구원, E-mail:shseo@kisti.re.kr, Tel: 051-831-2498)
1 부산대학교 기계설계인력양성센터

류해석기법, 공-탄성해석기법, 전산해석(CFD)기법 등을 이용한 다양한 연구가 시도되고 있다[2].

지금까지 풍력 터빈 블레이드의 성능향상을 위해 다양한 연구가 진행되고 있고 있으며, [3]은 풍력블레이드를 설계하기 위하여 익형(airfoil)을 따라 와류를 분포시키는 해석방법을 완성하였고, [4]는 실험을 통해 양항비(lift to drag ratio, C_L/C_D)를 조사하여 최적의 익형 형상을 결정하고자 하는 연구를 수행하였다[5].

그리고 [6]은 와류발생장치(vortex generator)를 적용하여 풍력블레이드 익형의 항력감소를 확인하였고, [7]은 groove를 활용한 익형 표면에서의 경계층(boundary layer) 박리(separation) 조절 등에 대한 연구를 수행하여, 경계층 두께(δ)에 대한 groove의 위치와 폭(width, d), 깊이(depth, h) 비를 제공하였다.

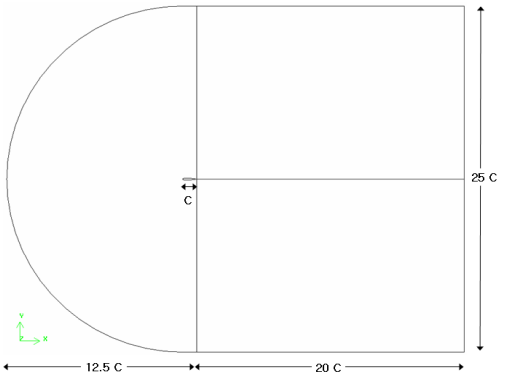
본 연구에서는 수평축 풍력블레이드 공력설계를 위한 기초연구로, NACA0015 익형을 대상으로 천이 sst(transition shear stress transfer, t-sst) 모델을 적용하여 groove의 형상과 개수, 위치에 따른 공력특성 정도를 전산해석을 수행하여 확인하고자 한다.

2. 전산해석

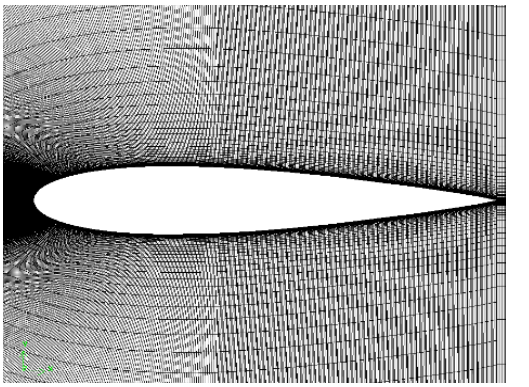
전산해석은 해석상의 효율을 도모하기 위해 2차원 형상을 이용하여 수행하였고, 해석영역(analysis domain)의 격자(grid)는 상용 프로그램인 GAMBIT을 활용하여 생성하였다.

Figure 1과 같이 유체가 유입되는 입구부는 익형 코드(chord, C)의 12.5 C, 익형 후류부의 길이는 20 C로 하여 수치계산 영역을 설정하였다.

천이모델의 적용을 통한 정밀한 층류 및 천이경계층 해석을 위해서는 벽면근방의 격자 공간해상도가 y+〈1의 조건을 만족해야 신뢰성 있는 해석결과의 확보가 가능한 것으로 알려져 있다[2, 8]. 따라서 본 연구에서의 격자구조는 가로방향 노드(node) 수 600개, 세로방향 노드 수 140으로 익형 주변의 격자를 집중시켜 수치적 오류 요인을 제거하였고, 익형의 벽면과 유동이 접하게 되는 부분에서는 경계층 형성 및 이탈에 따른 와유동의 생성을 충분히 모사할 수 있도록 하였다. 수치계산을 위해서 생성된 총 노드 수는 85,210개이며, 계산영역 내 입구경계는 균일 속도, 출구경계는 압력이 대기압과 같다는 조건을 부여하였다. 레이놀즈(Reynolds) 수는 3.6×10^5 으로 설정하여 받음각(angle of attack, AOA)을 2°에서 16°까지 변화시키면서 수행하였다.



(a) Computational analysis domain



(b) Grid generation near the airfoil

Figure 1: Computational analysis domain and grid generation

Groove가 있는 익형의 전산해석 결과에 대한 타당성을 검증하기 위하여 Sheldahl과 Klimas[9]가 제시한 익형 NACA0015의 공력특성 결과와 비교하였다.

유동은 2차원 난류모델로 표준 k-e과 천이 sst 모델을 적용하여 비교하였으며, Figure 2와

Figure 3과 같이 양력계수(lift coefficient, C_L)와 항력계수(drag coefficient, C_D) 그리고 양항비를 비교하였다.

Figure 2와 같이 〔9〕가 제시한 결과에서 받음각 10°근처에서 유동박리가 시작되고, 15°이후에서는 대규모 박리에 의한 양력계수의 급속한 감소와 항력계수의 급속한 증가로 실속(stall)을 관찰할 수 있다.

표준 k-e 모델의 경우, 양력계수는 〔9〕가 제시한 결과보다 다소 낮은 값을 보여주고 있으며, 항력계수는 다소 높은 값을 나타내고 있다. 천이 sst 모델의 경우에서는 받음각 10°까지는 〔9〕가 제시한 결과와 잘 일치함을 보였고, 받음각 13°부근에서부터 박리가 시작되는 것으로 나타났다.

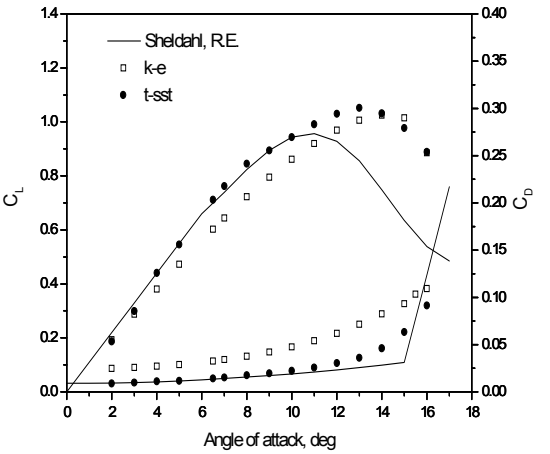


Figure 2: Lift and drag coefficient of NACA0015 with angle of attack.

양항비의 결과에서 Figure 3과 같이 표준 k-e 모델 보다는 천이 sst 모델이 〔9〕가 제시한 결과와 잘 일치함을 보여주고 있다.

이와 같이 k-e 모델은 익형의 경우에서 박리지점(separation point)의 부정확한 예측 및 실속지연 등의 문제가 발생한다. 이는 점성저층(viscosity sub-layer) 영역에서의 경계층(boundary layer) 박리 예측에 실패한데 기인한 것으로 알려져 있으며, sst 모델의 경우 역 압력구배에 의해 발생하는 와류의 크기와 박리지점을 비교적 정확하게 예측한다고 평가 받고 있다〔2〕.

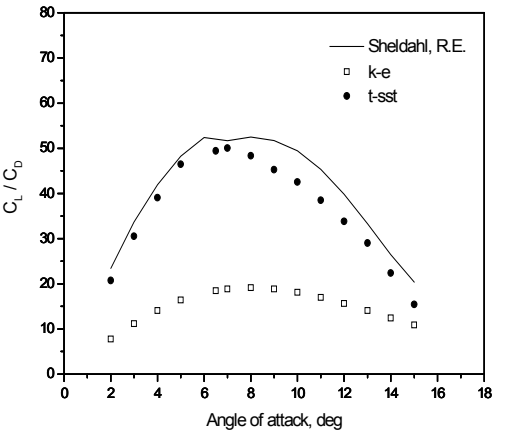


Figure 3: Lift to drag ratio of NACA0015 with angle of attack.

그리고 Table 1과 같이 〔7〕가 제시한 groove가 없는 매끄러운(smooth) 익형 NACA0015의 받음각 3°, 레이놀즈 수 238k에서의 박리 및 재부착지점(reattachment point)에 대한 비교에서도 본 연구에서 적용한 천이 sst 모델의 결과와 잘 일치함을 확인할 수 있었다.

지금까지의 groove에 의한 익형의 유동제어 연구는 박리억제를 위한 groove의 형상, 위치, 크기 조건을 찾는데 초점이 맞추어져 있다.

Table 1: CFD and Experimental comparison for smooth airfoil(NACA0015, Re=238k).

		R. & S.[7]	t-sst(CFD)
0°	Separation Point	58%	56%
	Reattachment Point	83%	79%
3°	Separation Point	38%	35%
	Reattachment Point	56%	57%

앞서 언급한 〔7〕은 익형 NACA0015에 단일 원형 groove가 있는 실험에서 다음과 같은 결과를 제시하였다. 박리억제를 위한 최적의 groove 깊이는 경계층 두께 대비 0.6에서 1.0의 범위이며, groove의 폭 대비 깊이의 비는 0.1에서

0.15이다. 그러나 매끄러운 익형에 비하여 groove가 있는 경우에서 박리를 억제하는 효과는 있으나, 양력계수가 11% 감소하고 항력계수는 27.7% 증가하여 오히려 풍력블레이드의 성능 향상을 위한 공력특성 결과는 보여주지 못하였다.

따라서 본 연구는 물체 표면에 Figure 4와 같이groove의 개수, 위치, 깊이, 폭, 간격의 다양한 경우에 대하여 익형의 양항비를 최대화 할 수 있는 조건을 전산해석을 통해 알아보고자 한다.

본 연구에서의 groove의 위치는 〔7〕이 제시한 박리 시작점의 앞부분에 위치하며, 깊이(depth)를 h, 폭(width)을 d, groove 사이의 간격(length)을 p로 설정하였다.

경계층 두께(δ)와 groove 깊이(h) 비는 0.5에서 1.1의 범위이며, groove의 깊이(h) 대비 폭(d)의 비는 0.1에서 0.2의 범위이고, groove 사이의 거리(p)는 groove 폭(d)의 0.8에서 1.2사이의 비로 설정하였고, groove의 수는 최대 3개까지 적용하여 Table 2와 같이 총 9가지의 경우에 대한 전산해석을 수행하였다.

일반적인 풍력블레이드 익형의 경우, 7°가 되는 받음각을 가질 때 최대의 효율을 나타낼 수 있도록 설계하는 것으로 알려져 있어〔10〕, 본 연구에서도 받음각 7°를 기준으로 전산해석을 수행하였다. 받음각 7°에서 측정된 박리지점의 경계층 두께는 1.38mm 이고, 박리 시작점은 X/C=0.075 지점이다.

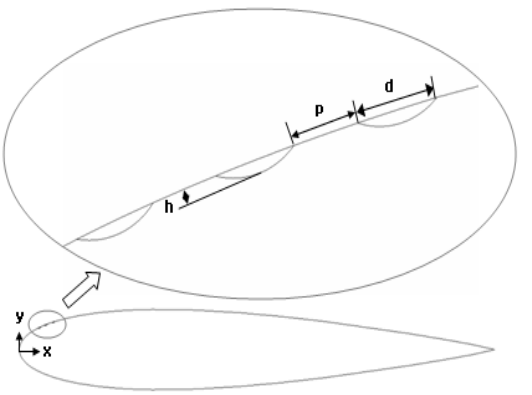


Figure 4: Shape of the airfoil with grooves.

Table 2: Characteristics of the grooves used

grooved	depth h (δ/h)	width d (h/d)	length p (p/d)	groove (ea)
case 1	2.76 (0.5)	27.6 (0.1)	- -	1
case 2	2.76 (0.5)	18.4 (0.15)	18.4 (1.0)	2
case 3	2.76 (0.5)	13.8 (0.2)	16.6 (1.2)	3
case 4	1.73 (0.8)	17.3 (0.1)	17.3 (1.0)	3
case 5	1.73 (0.8)	11.5 (0.15)	- -	1
case 6	1.73 (0.8)	8.6 (0.2)	6.9 (0.8)	2
case 7	1.26 (1.1)	12.6 (0.1)	15.0 (1.2)	2
case 8	1.26 (1.1)	8.4 (0.15)	6.7 (0.8)	3
case 9	1.26 (1.1)	6.3 (0.2)	- -	1

3. 결 과

풍력블레이드에 사용되는 익형은 일반적인 항공기용 익형과는 부분적으로 성격이 다르기 때문에, 공기역학적 특성과 성능이 양항비가 높을수록 발전시스템에 유리하다는 것을 고려하여〔10〕, 다음의 Figure 5와 같이 매끄러운 익형의 경우와 다양한 형상의 groove가 있는 9가지의 경우에 대하여 양력계수, 항력계수 그리고 양항비에 기초하여 익형의 효율을 비교하였다.

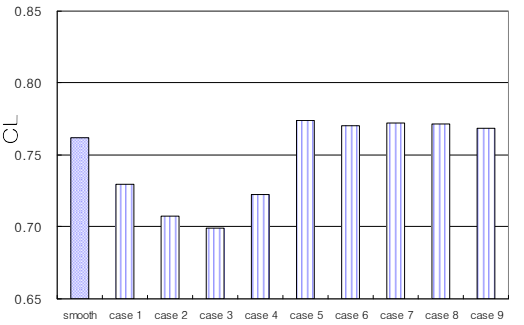
Case 1~3의 경우인 δ/h의 비가 0.5에서는 매끄러운 익형에 비해 양력계수는 case 3에서 최대 8% 이상 감소하였고 항력계수는 최대 37% 이상 증가하였다. 그리고 양항비는 최대 33% 이상 감소하였다.

Case 5~9의 경우에는 δ/h의 비가 0.8, 01에서 매끄러운 익형의 경우보다 양력계수는 case 5에서 최대 1.5% 이상 증가하였고, 항력계수는 case 7에서 최대 6.5% 이상 감소함을 보여, 양항비는 case 7에서 최대 8.7% 증가한 결과를 보였다. 즉, 경계층과 groove의 깊이 비(δ/h)는 1.1, 깊이와 폭의 비(h/d)는 0.1, groove간의 간격과 폭의 비(p/d)는 1.2이며, groove는 2개의 경우에서 가장 우수한 것으로 나타났다.

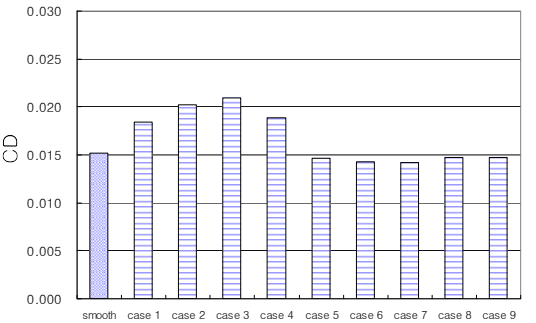
Figure 6은 양항비가 가장 낮은 case 3과 가장 높은 case 7의 경우에서 익형 표면의 압력계수(pressure coefficient)의 분포를 비교하였다.

Case 3의 경우에서는 Robarge와 Stark〔7〕의 단일 groove에 의한 결과와 유사한 스파이크

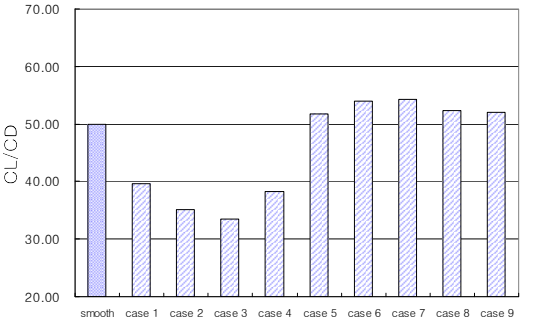
(spike) 형태의 압력계수 분포가 발견되었다. 그리고, case 3의 경우, 매끄러운 익형의 X/C=0.2 부근에서 나타나는 박리 재부착과 박리기포(separation bubble)에 의한 급속한 압력계수의 상승은 나타나지 않았다.



(a) Comparison of lift coefficient



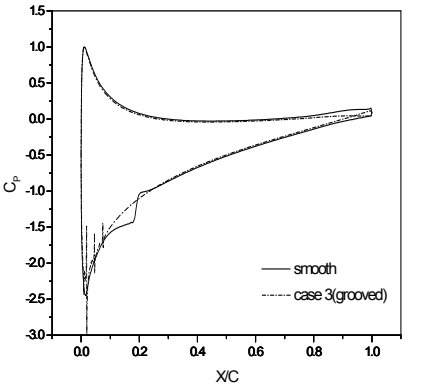
(b) Comparison of drag coefficient



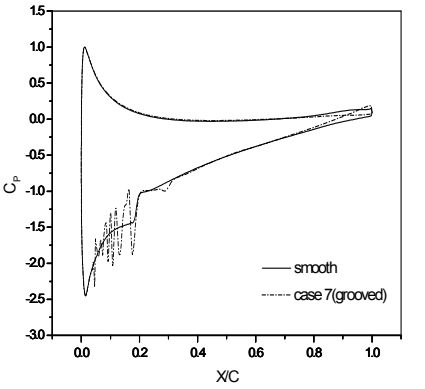
(c) Comparison of lift to drag ratio

Figure 5: Comparison of lift, drag coefficient and lift to drag ratio for smooth and grooved airfoil at 7° AOA.

Case 7의 경우에서는 case 3에서 보다 많은 다수의 스파이크 형태의 압력계수 분포가 발견되었고, X/C=0.3 부근에서 국소적인 압력감소가 나타났다. 이러한 case 3과 비교되는 다수의 스파이크 형태의 압력분포는 Figure 7에서 보여주는 속도장(velocity contour)에서 확인할 수 있듯이, case 7의 경우에는 groove 이후에서 생성된 연속적인 박리의 재부착에 의한 박리기포가 발견되지만, case 3의 경우에서는 이러한 박리기포가 발견되지 않고 있다. 이러한 연속적인 박리기포의 생성이 groove 이후 압력계수 분포곡선에서 다수의 스파이크 형태로 나타나는 것으로 파악된다.



(a) case 3



(b) case 7

Figure 6: Comparison of pressure coefficient distribution for smooth and grooved airfoil at 7° AOA.

Figure 8에서는 익형 벽면 근처에서의 국소 속도분포를 X/C=0.30, 0.35 지점에서 측정한 결과를 나타내었다.

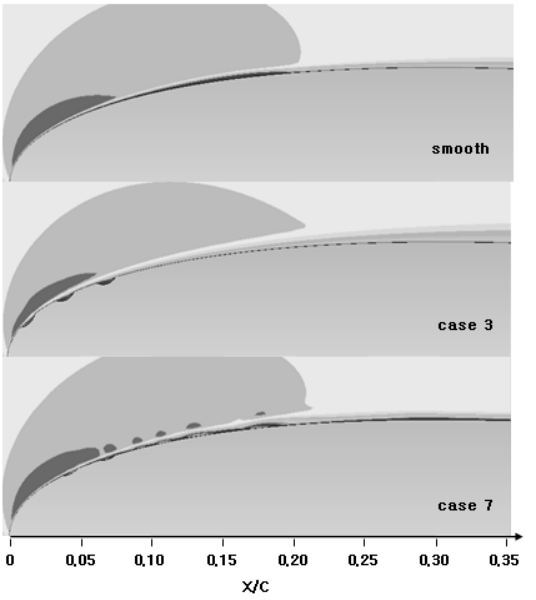
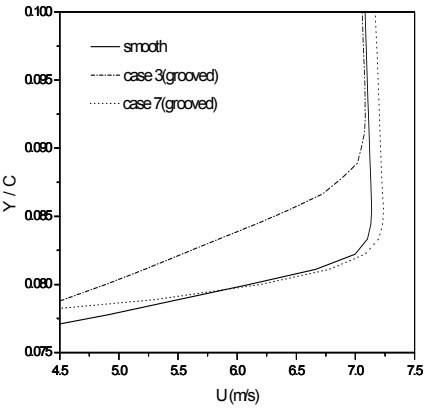


Figure 7: Comparison of velocity contours for smooth and grooved airfoil at 7° AOA.

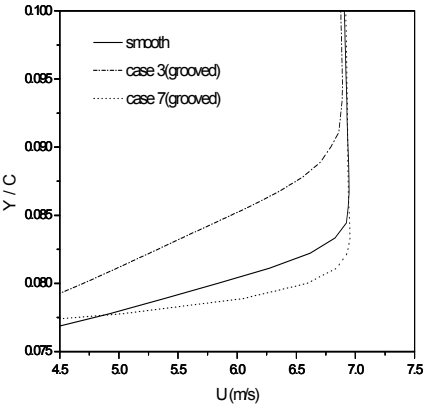
Case 3의 경우에서는 X/C=0.30, 0.35 지점에서 매끄러운 익형보다 벽면 근처에서 낮은 속도분포를 보였으나, case 7의 경우 X/C=0.30 지점에서 익형 벽면에서 부터 Y/C=0.08까지는 매끄러운 익형과 거의 유사한 속도분포를 가지고, Y/C=0.08 이후에서는 매끄러운 익형 보다 높은 속도분포를 보였다. X/C=0.35 지점에서는 case 7의 경우가 매끄러운 익형의 경우보다 벽면 근처에서 속도분포가 높게 나타났다.

이는 〔11〕이 언급한 다수의 groove에 형성된 유동교란이 벽면 근처 유동으로 지속적인 운동량이 공급되어 벽면 근처에서의 속도회복에 기인하는 것으로 파악된다.

Figure 9에서는 7°이외의 받음각에서 익형 표면에 생성된 groove의 영향을 알아보기 위하여, case 7의 groove 형상에 대한 받음각 4~11°의 범위에서 매끄러운 익형과 양항비를 비교하였다.



(a) X/C=0.30



(b) X/C=0.35

Figure 8: Streamwise flow velocity distribution near the airfoil up-wall for smooth and grooved airfoil at 7° AOA.

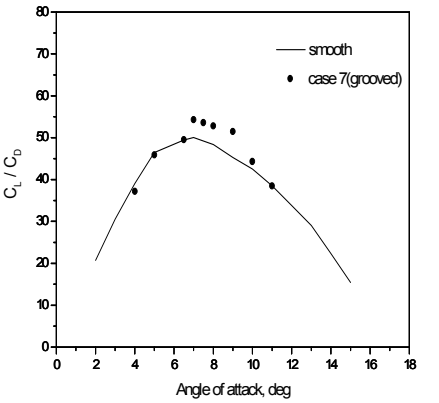


Figure 9: Lift to drag ratio of NACA0015 with angle of attack.

받음각 4~6.5°의 범위에서는 매끄러운 익형의 양항비와 거의 일치하는 결과를 나타내었고, 받음각 7~11°까지는 매끄러운 익형의 양항비 보다 높은 값을 보여, groove에 의한 양항비의 향상정도가 일정 받음각 이후까지 지속됨을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 풍력블레이드의 성능향상을 위해 익형 NACA0015 표면에 다양한 형태의 groove를 생성하여 매끈한 익형과의 양항비를 전산해석을 통해 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

익형의 공기역학적 특성분석을 위해서는 k-e 난류모델보다는 천이 sst 난류모델이 점성저층 영역에서의 경계층 박리 예측과 역 압력구배에 의한 와류를 보다 정확하게 예측가능 한 것을 재확인 할 수 있었다.

본 연구의 계산 범위에서는 경계층과 groove 깊이의 비(δ/h)는 1.1, groove 깊이와 폭의 비(h/d)는 0.1, groove 사이의 거리와 폭의 비(p/d)는 1.2 그리고 groove 수는 2개의 경우에서 양항비가 8.7% 향상됨을 보여, groove가 풍력블레이드 익형의 성능향상에 도움이 되는 것으로 나타났다.

Case 7의 groove형상이 익형 벽면 근처에서의 속도회복에 기인함을 확인할 수 있었고, groove에 의한 양항비의 개선정도가 특정 받음각 이후에서도 지속됨을 확인 할 수 있었다.

그리고 본 연구에서 수행한 계산범위의 결과에서는 case 7의 경우에서 양항비가 가장 우수하였으나 case 7의 경우가 최적의 조건이라고는 말할 수 없다. 따라서 향후 풍력블레이드의 성능향상을 위한 최적의 설계인자를 확보하기 위해서는 실험계획법 등을 통하여 보다 면밀하고 다양한 후속 연구가 필요할 것으로 본다.

참고문헌

[1] 창원대-KAIST 협력사업 결과보고서, 풍력터빈 블레이드 구조해석용 CFD 풍압데이터 산출, 한국과학연구원, 2011.

[2] 김범석, 김만응, 이영호, "CFD에 의한 2D 에어포일 공력특성 및 3D 풍력터빈 성능예측", 대한기계학회논문집 B권, 제32권, 제7호, pp. 549-557, 2008.

[3] B. Kamoun, D. Afungchui and A. Chauvin, "A wind turbine blade profile analysis code based on the singularities method," Renewable Energy, vol. 30, pp. 339-352, 2005.

[4] P. Giguere and M. S. Selig, "New airfoils for small horizontal axis wind turbines," Trans. ASME J. of Solar Energy Engineering, vol. 120, pp. 108-114, 1998.

[5] 신지영, 손영석, 차득근, 이철균, 황이철,"수직축 풍력터빈 블레이드의 공기역학적 특성," 한국마린엔지니어링학회지, 제30권, 제8호, pp. 877-884, 2006.

[6] Tetsuya Kogaki, Hikaru Matsumiya, Kaori Kieda, Naofumi Yoshimizu And Yuusuke Yamamoto, "Performance Improvement Of Airfoils For Wind Turbines By The Modified Vortex Generator," 2004 European Wind Energy Conference, http://www.2004ewec.info/, 2004.

[7] Tyler W. Robarge and Aaron M. Stark, "Design considerations for using indented surface treatments to control boundary layer", AIAA 2004-425.

[8] Langtry, PR. B. and Menter, F. R., "Transitional modeling for general CFD applications in aeronautics", AIAA 2005-522.

[9] Sheldahl, R. E. and Klimas, P. C., "Aerodynamic Characteristics of seven airfoil sections through 180 degrees angle of attack for Use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines", http://www. cyberiad.net/

library/airfoils/ foildata/, 1981.
[10] 황병선, 최신 풍력터빈의 이해, 도서출판 아진, 2009.
[11] Jin Choi, Woo-Pyung Jeon, and Heacheon Choi, "Mechanism of drag reduction on a sphere," Physics of Fluid 18, 041702, 2006.

저 자 소 개

홍철현(洪徹弦)

1970년생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1999년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 1999년~2000년 대우정밀(주), 2004년 부산대학교 대학원 기계공학과 졸업(공학박사), 2000년~현재 부산대학교 기계설계전산화인력양성센터 전임연구원

서성호(徐成昊)

1971년생, 1997년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학사), 1999년 부산대학교 기계공학과 졸업(공학석사), 부산대학교 기계공학과(박사과정), 1999년~현재 한국과학기술정보연구원(KISTI) 근무