

# 표면거칠기 둔감도를 고려한 풍력발전기용 익형 개발

김석우\*, 신형기, 장문석

## Wind Turbine Airfoils considering Surface Roughness Effects

Seokwoo Kim\*, Hyunki Shin, Moon Seok, Jang

**Abstract** Most airfoils for wind turbines commercially available have been developed for aircrafts, which are operated at high Reynolds numbers. However, Reynolds numbers of wind turbines are very low compared to those of aircrafts. In order to improve wind turbine performances, airfoils for the use of wind turbine shall be designed such as S-series airfoils developed by NREL in America. The authors have designed new airfoils for wind turbines considering designated operation conditions of wind turbines and even local wind resources in Korea. The designed airfoils are characterized by improved roughness insensitivities compared to other airfoils such as S814 and S820. The developed KWA005-240 and KWA009-127 are for root and tip sections of a wind turbine blade, respectively. Although the results show much improved performances against NACA airfoils, performance data of post-stall regulation loses some accuracies due to the characteristics of the simulation tool of XFOIL. Therefore, wind tunnel experiments are required for more accurate evaluation of the designed airfoils. Currently, the experiments have been completed and the data analysis works are going on now. The final results obtained from the experiments will be published soon.

**Key words** Airfoil(익형), Blade(날개), Aerodynamics(공력), Wind Turbine(풍력발전기), Lift-Drag Ratio(양항비), Roughness Insensitivity(표면거칠기 둔감도)

\* 한국에너지기술연구원

■ E-mail : wemins@kier.re.kr ■ Tel : (042)860-3568 ■ Fax : (042)860-3543

### Nomenclature

Cl : lift coefficient  
Cd : drag coefficient  
Cp : power coefficient  
Cm : moment coefficient  
TSR : tip speed ratio

### 1. 서론

풍력발전기 블레이드 설계에 활용되는 익형은 기본적으로 항공기용으로 개발된 익형이 주류를 이루고 있다. 이는 이미 전 세계적으로 약 2,000여종 이상의 항공기용 익형이 개발되어 있는 상황에서 가장 효율적인 방법이기도 하다. 그러나 항공기용 익형은 풍력발전기에서 요구하는 기본 특성과는 상이한 점들이 있으며, 그 중 대표적인 것이 적용 레이놀즈수이다.

항공기용 익형의 경우 기본적으로 레이놀즈 수가 6,000,000 이상의 유동장을 적용 범위로 하고 있다. 그러나 풍력발전기용 익형의 경우 레이놀즈 수 2,000,000 이하가 주요 운전범위에 해당한다. 따라서 레이놀즈 수가 낮아질수록 공력특성이 저하하는 항공기용 익형을 그대로 풍력발전기에 적용하는 것은 비효율적이다.

또한 표면거칠기 변화에 대한 응답특성 역시 항공기용 익형의 경우에는 중요한 고려 사항이 아니지만, 지상으로부터 수십 미터 내외의 높이에서 회전운동을 하는 풍력발전기용 날개의 경우 대기 중 오염물질 및 곤충 등에 의한 표면거칠기 변화가 공력성능에 미치는 영향을 무시할 수 없으며, 더불어 주기적 표면 세척이 어려운 특성을 고려할 때 표면거칠기 변화에 대한 둔감성이 중요 고려 요소이다.

이상의 요인들로 인하여 풍력발전기에 특화된 익형의 개발 중요성이 널리 인식됨에 따라 해외에서는 고유 익형의 개발 및 이를 적용한 회전날개의 개발에 주력하고 있다. 특히 덴마크의 RISOE, 네델란드의 Delft 대학 및 미국의 NREL (National Renewable Energy Laboratory) 등에서는 고유의 익형을 개발하고 이를 적용한 풍력발전기 회전날개를 설계/제작하여 상용화하고 있다. 다음의 Fig. 1 및 2는 Delft 및 NREL의 개발 익형의 예를 나타내고 있다.

한국에너지기술연구원에서는 2006년부터 풍력발전기 익형의 개발을 수행하여 왔으며, 그 결과 루트 및 팁 적용을 위한 KWA005-240 및 KWA009-127 등 2개의 익형 개발 및 특허 출원을 완료하였다. 개발 익형은 국내 평균풍속이 유럽에 비해 현저히 낮은 풍황분포를 보이는 점을 고려하여 이에 최적화되었으며 특히 표면거칠기 변화에 대한 둔감성이 강조되었다. 현

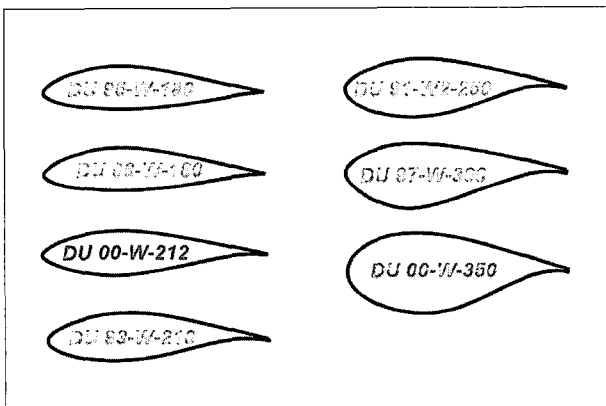


Fig. 1 Delft Univ. Blade Airfoils

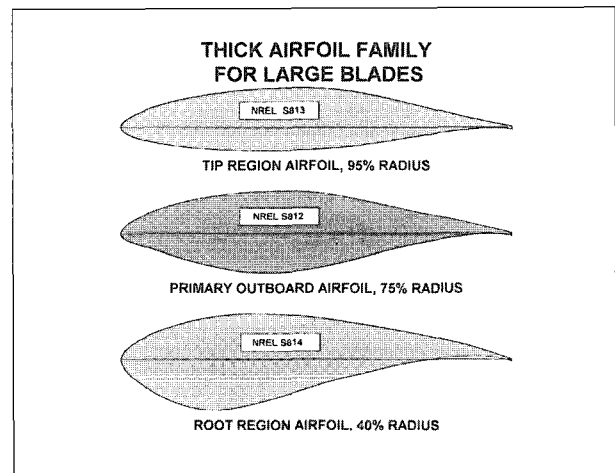
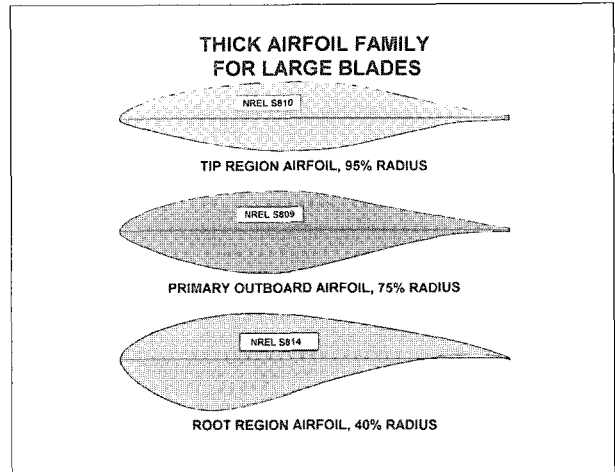


Fig. 2 NREL Blade Airfoils

재 개발 익형을 적용한 100kW급 풍력발전기 회전날개에 대한 설계 및 시제품 제작이 진행 중이며, 본 논문에서는 개발 익형의 공력 특성 및 개발 익형이 적용된 회전날개의 성능특성에 관한 연구결과를 요약하였다.

## 2. 익형 설계자료 분석

### 2.1 기존 익형의 공력특성

고유 익형의 설계를 위해 현재 풍력발전기용 회전날개에 적용되고 있는 익형의 공력특성을 분석함으로써 본 연구에서 개발하고자 하는 익형의 목표 지향점을 명확히 정의하고자 하였다. 이를 위해 RISOE에서 발간한 익형자료<sup>1),2)</sup>를 활용하여 27

종의 익형을 두께비로 분류하여 각각의 양항비(Cl/Cd) 성능을 비교분석하였다.

다음의 Fig. 3 및 4는 두께비 분류에 따른 각 익형의 양항비를 보여준다.

일반적으로 풍력발전기 회전날개의 경우 두께비가 약 20% 이상의 익형은 허브에 연결되는 회전날개의 루트 부분에 적용되며, 그 특성상 낮은 양항비를 지니게 된다.<sup>(3)</sup> Fig. 3은 높은 두께비를 갖는 루트용 익형의 공력 특성을 잘 나타내고 있다. 일반적으로 루트에 적용되는 익형은 80 이하의 낮은 양항비를 갖게되며 그림에 도시된 바와 같이 NACA 63-430 익형은 전체적으로 40 이하의 매우 낮은 양항비를 지니고 있다. 이는 1절에서 설명한 바와 같이 NACA 시리즈 익형이 고속으로 운동하는 항공기용으로 개발되었기 때문으로써 Delft 대학에서 개발된 풍력발전기용 익형인 DU 91-W2-250 및 DU 93-W-210 익형의 경우에는 최대 양항비가 80 이상에 달하고 있는 우수한 성능을 나타내고 있다.

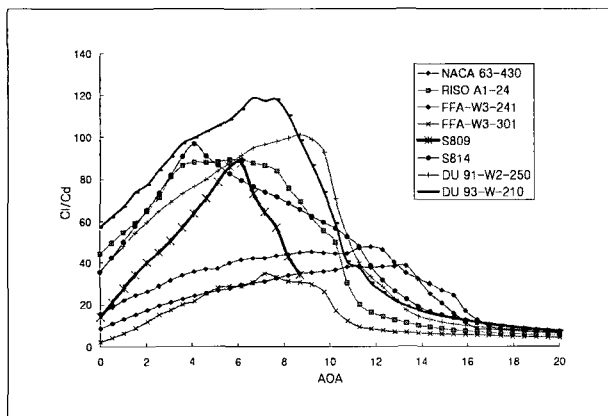


Fig. 3 Tick Airfoils (22%)

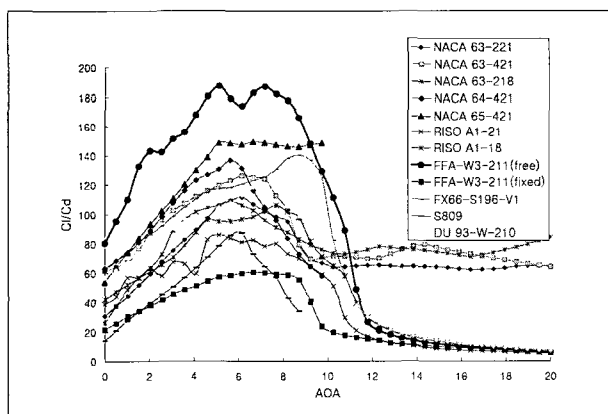


Fig. 4 Moderate Airfoils (22%)

또한 루트에 적용되는 익형과는 달리 팁 부분에 적용되는 익형은 Fig. 4와 같이 높은 양항비를 가질 것을 요구 받는데 이는 풍력발전기 회전날개의 공력특성이 팁 부분의 설계에 의해 크게 영향 받기 때문이다. 특히 스웨덴의 Aeronautical Research Institute에 의해 개발된 FFA 시리즈 익형의 경우 최대 약 180에 이르는 가장 우수한 양항비를 갖는 것으로 분석되었다.

이상의 분석결과에 근거하여 본 연구에서는 루트부의 경우 100, 팁은 140 이상의 양항비를 갖는 익형의 개발을 목표로 설정하였다.

## 2.2 표면거칠기 변화 둔감도

풍력발전기용 회전날개는 1절에 기술한 바와 같이 표면거칠기 증가에 따른 성능저하가 적어야 한다. 기본적으로 항공기용 익형은 층류 경계층이 유지되도록 설계하며, 표면거칠기 변화에 따른 공력 성능저하가 급격하게 이루어진다.<sup>(4)</sup>

표면거칠기가 증가하게 되면 어느 시점에서 층류경계층이 난류경계층으로 천이되며 이를 모델링하기 위해 익형의 Leading Edge에서 천이가 강제 발생하도록 유동해석조건을 가정함으로써 표면거칠기 변화의 영향을 모사할 수 있다. 본 연구에서는 미국 NREL에서 개발한 익형인 S809를 대상으로 하여 Free Transition 조건과  $x/c=0.07$ 인 지점에서 강제천이가 발생하는 Forced Transition의 경우에 대해 공력특성 변화를 XFOIL을 사용하여 분석하였다. 적용된 레이놀즈 수는 1,000,000이며 받음각의 변화범위는 0 ~ 20°이며, 다음의 Fig. 5, 6 및 7은 각각의 경우에 대한 공력특성의 변화를 보여

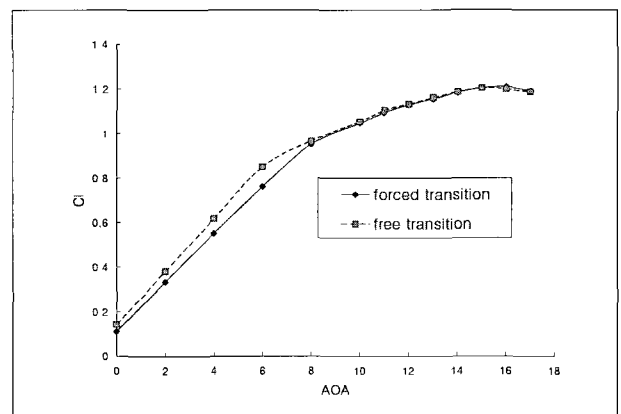


Fig. 5 Cl Comparison

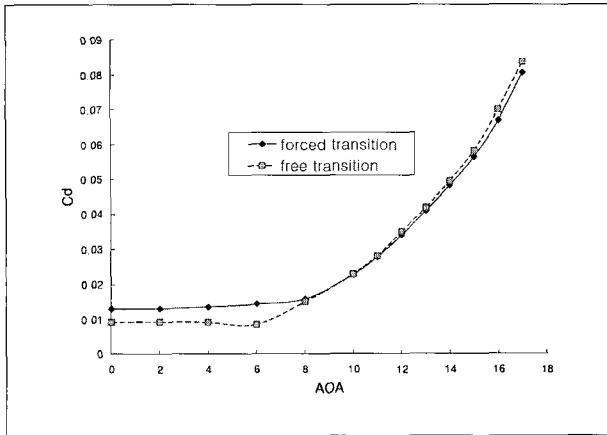


Fig. 6 Cd Comparison

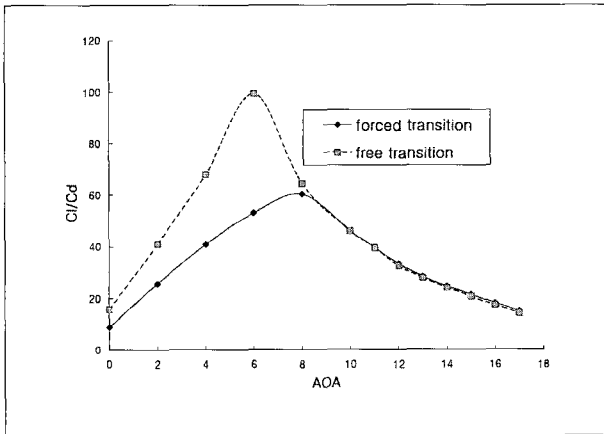


Fig. 7 Cl/Cd Comparison

주고 있다. 표면거칠기 둔감도가 100%라는 것은 강제천이가 발생하는 경우, 즉 표면거칠기가 증가하는 경우에도 양항비의 저하가 전혀 없는 상태를 의미하며, 둔감도가 80%라면 양항비가 20% 저하되었음을 나타낸다.

S809 익형의 경우 받음각이 8° 이상인 범위에서는 표면거칠기 변화에 의한 공력성능의 저하가 거의 발생하지 않음을 알 수 있으며, 그 이하의 받음각 범위에서는 약 62%의 표면거칠기 둔감도를 나타내고 있다. 이는 풍력발전기용 익형으로서는 민감도가 큰 편에 속하는 것이며, Fig. 7에 보이는 바와 같이 특히 Free Transition 상태에서 양항비의 변화가 급격하므로 S809 익형이 적용된 회전날개의 경우 TSR에 대한 Cp 값의 급격한 변화가 발생하게 되므로 바람직하지 못하다. 이상의 표면거칠기 둔감도 분석에 의거하여 본 연구에서 개발하고자 하는 익형의 표면거칠기 둔감도는 80% 이상을 목표로 설정하였다.

### 3. 풍력발전기용 익형 설계

#### 3.1 루트 익형

루트용 익형의 개발은 Inverse Design 기법을 적용하여 이루어졌으며 형상 개발에 앞서 요구 Cp의 분포를 먼저 정의하였다. Cp 분포를 정의함에 있어 가장 주의를 기울인 부분은 표면거칠기 변화에 의한 민감도 둔화이다. 이를 위해 Transition Point를 Leading Edge 부근에 위치하도록 Cp 분포를 가정하였으며 더불어 가능한 높은 Cl 값을 갖도록하기 위해 익형 후단에서 양력이 추가로 발생할 수 있도록 하였다. 이를 통해 표면거칠기 변화에 대한 둔감성 확보를 위해 낮추어진 양력을 보완하는 효과도 기대할 수 있다.

이외에도 Separation Ramp를 만들어 Trailing Edge 부근에서의 실속을 유도함으로써 부드러운 실속 특성을 갖도록 고려하였다. 다음의 Fig. 8은 개발 익형의 Cp 분포이다.

그림과 같은 Cp 분포를 통해 설계된 회전날개 루트용 익형

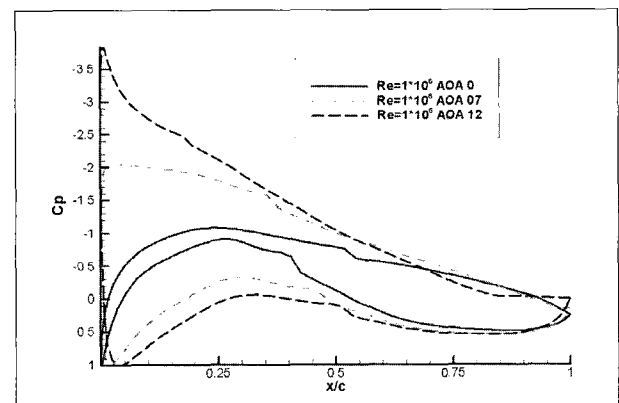
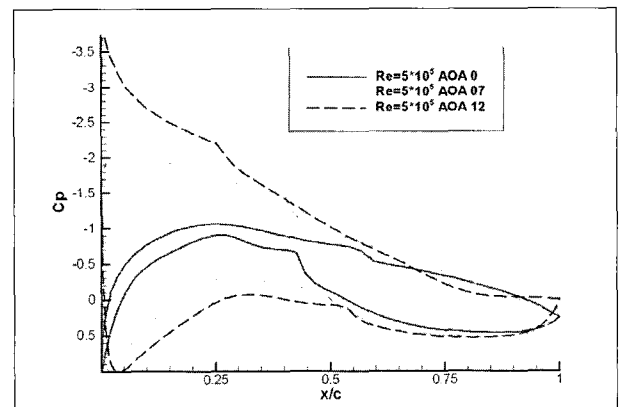


Fig. 8 Cp Distribution for KWA005-240

은 두께비 0.2462, 캠버 0.0396으로써 Fig. 9와 같은 형상을 갖는다. 설계 익형은 XFOIL을 이용하여 Free Transition 및 Forced Transition 상태에서 레이놀즈 수가 각각 500,000, 1,000,000 및 2,000,000의 경우에 대해 공력성능을 해석하였다. Fig. 10~14는 그 결과를 보여준다.

설계 익형은 XFOIL을 이용하여 Free Transition 및 Forced Transition 상태에서 레이놀즈 수가 각각 500,000, 1,000,000 및 2,000,000의 경우에 대해 공력성능을 해석하였다. Fig. 10~14는 그 결과를 보여준다.

개발된 익형은 레이놀즈 수 1,000,000에서 최대 Cl이 1.65,

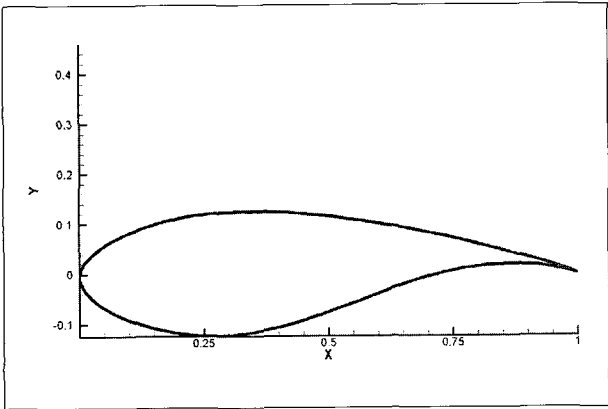


Fig. 9 Geometry of KWA005-240

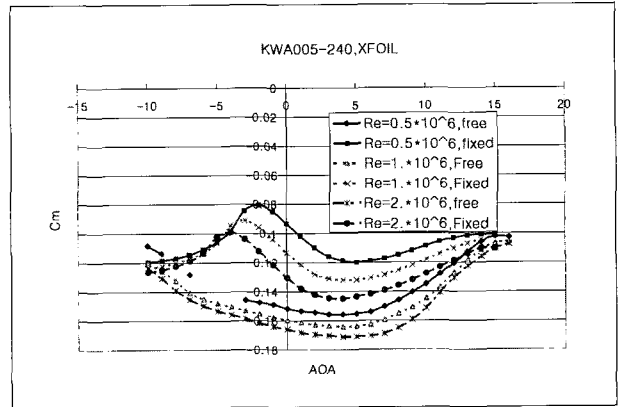


Fig. 12 Cm Distribution of KWA005-240

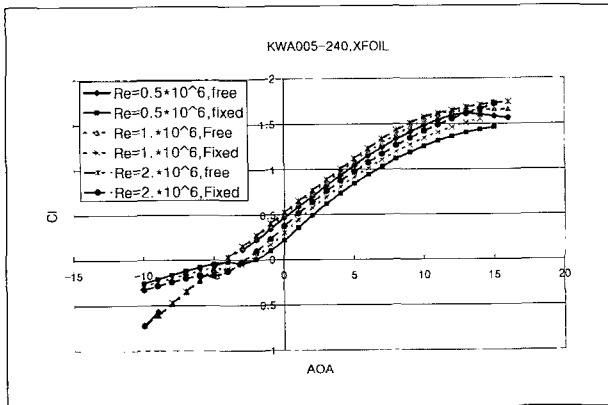


Fig. 10 Cl Distribution of KWA005-240

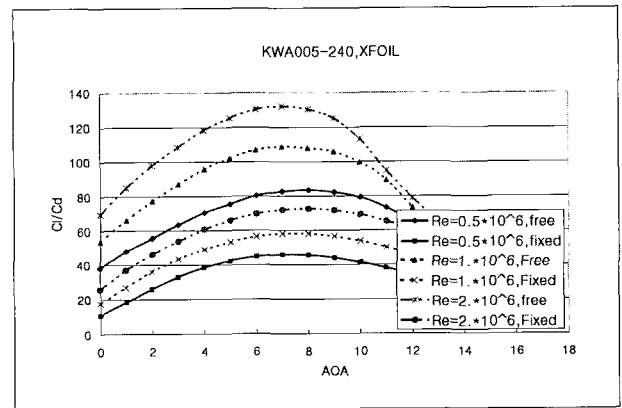


Fig. 13 Cl/Cd Distribution of KWA005-240

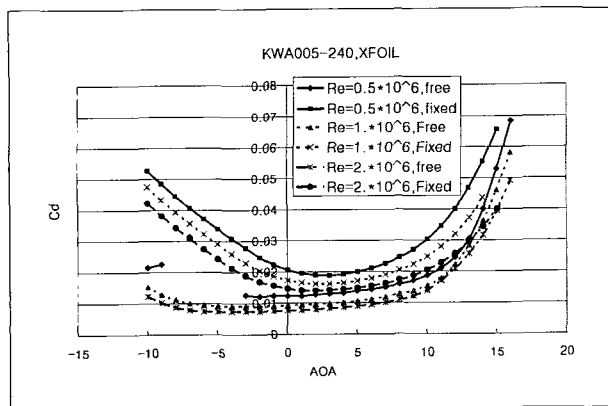


Fig. 11 Cd Distribution of KWA005-240

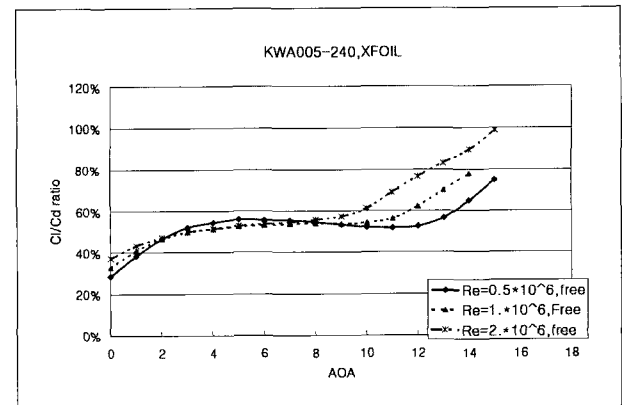


Fig. 14 Roughness Insensitivity of KWA005-240

최대 양항비가 108이며 표면거칠기에 둔감도는 80%로서 2절의 설계조건 분석을 통해 도출된 설계목표를 달성하였다. 그러나 해석도구로 사용된 XFOIL의 특성 상 CI의 경우 실속조건 이후에서의 분석 정확도는 현저히 저하되므로 위 해석결과로써 개발된 익형의 공력성능을 최종적으로 정의하기에는 부족하다.

이를 보완하고 보다 정확한 공력성능의 평가를 위해서는 모델 익형을 통한 풍동실험이 필수적이다. 개발 익형에 대한 풍동실험은 2007년 7월 완료되었으며 현재 그 실험결과를 분석 중이며 최종 성능평가 결과는 차후 발표 예정이다.

비록 실속 조건 이후에서의 분석 정확도는 저감하나 보다 객관적인 성능평가를 위해 본 연구에서 개발한 루트용 익형을 유사한 해외 개발 익형인 NREL의 S814<sup>(6)</sup> 및 Delft 대학의 DU91-W2-250과 그 성능을 비교평가하였다. Fig. 15는 각각의 익형에 대한 형상을 비교한 경우이며 Fig. 16은 공력특성을 비교 분석한 결과이다. 모든 분석은 XFOIL을 이용한 계산결과를 활용하였다.

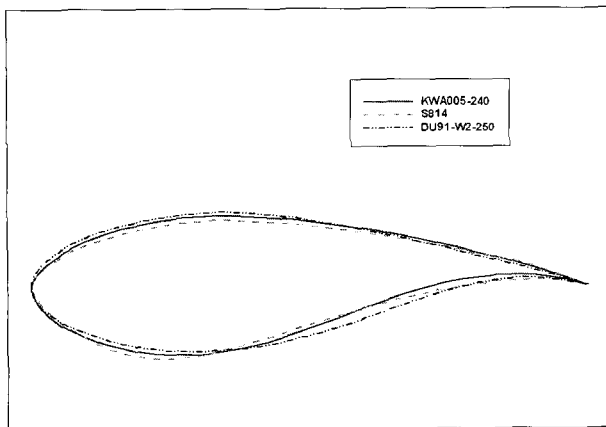
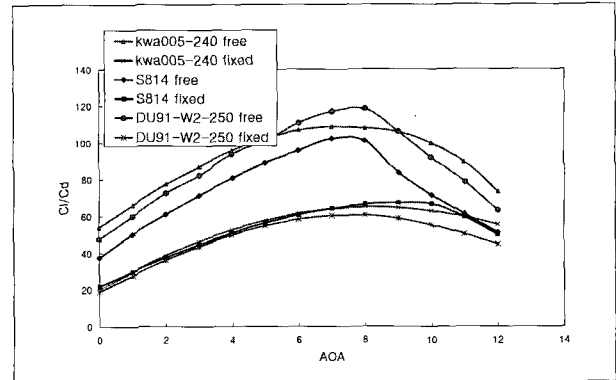
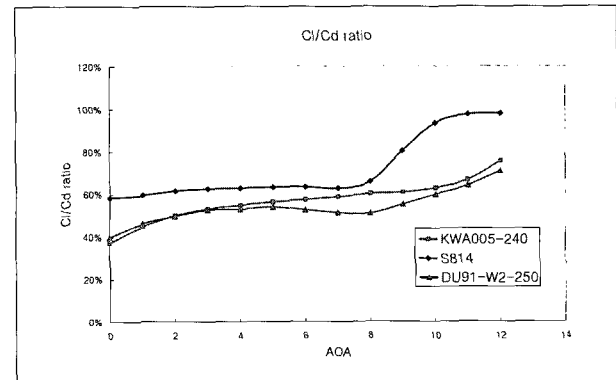


Fig. 15 Geometry Comparison

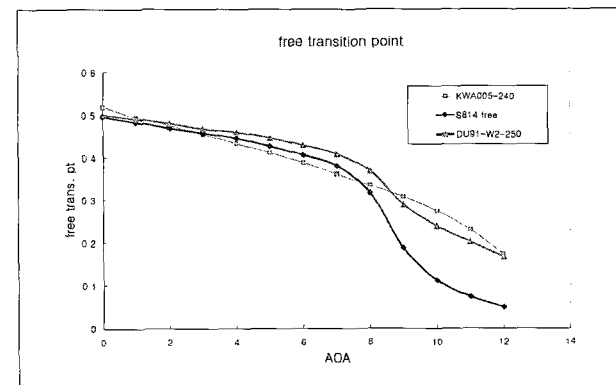
그림에서 알 수 있듯이 표면거칠기 변화에 대한 둔감도는 S814에 비교하여 개발 익형이 보다 민감하지만 양항비에서는 오히려 우수한 결과를 나타낸다. 반면 DU91-W2-250에 비해서는 보다 우수한 표면거칠기 둔감성을 갖고 있음을 알 수 있다. 즉, 본 연구에서 개발된 익형은 비교적 최근에 풍력발전기용으로 해외에서 개발된 루트용 익형과 비교 시 우수한 공력성능을 지니고 있음을 알 수 있다.



(a) Cl vs. Cd Ratio



(b) Roughness Insensitivity



(c) Transition Points

Fig. 16 Comparison of Aerodynamic Performances between KWA005-240, S814 and DU91-W2-250

### 3.2 팁 익형

팁 익형 역시 3.1절에서 설명한 루트용 익형과 동일한 방법에 의해 개발이 이루어졌다. 개발된 익형은 0.1266의 두께비와 0.0364의 캠버를 지니고 있으며 그 형상은 Fig.17과 같다.

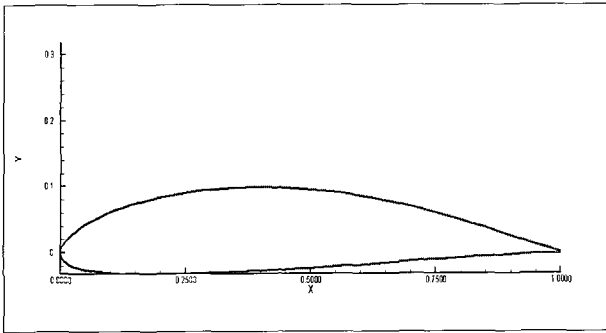


Fig. 17 Geometry of KWA009-127

다음의 Fig. 18 ~ Fig. 22는 팁 익형 KWA009-127의 공력 성능을 분석한 결과이다. 개발 익형은 레이놀즈 수 1,300,000에서 최대  $C_l$  1.6, 최대 양항비 140을 나타내며, 표면거칠기 둔감도는 97%로써 매우 우수한 결과를 보여준다. 그러나 이 부분 역시 전술한 바와 같이 실속 이후 조건에서의 정확성 문제로 인해 풍동실험 결과를 통해 최종적인 성능평가가 가능하다.

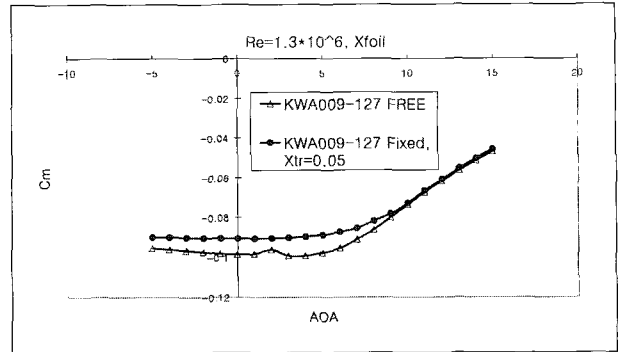


Fig. 20  $C_m$  Distribution of KWA009-127

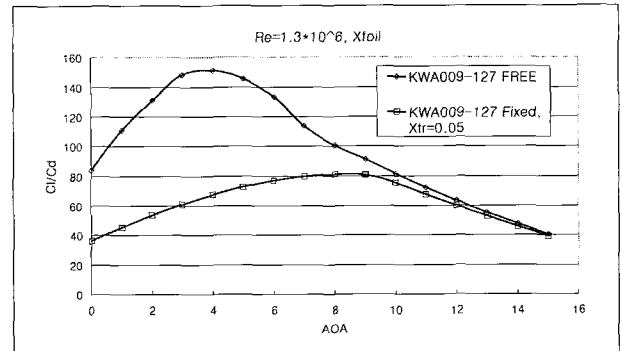


Fig. 21  $C_l/C_d$  of KWA009-127

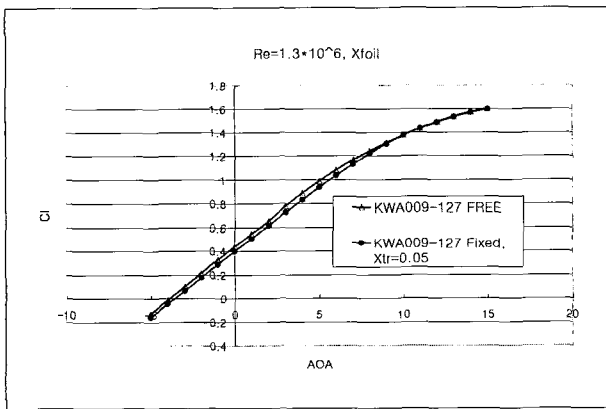


Fig. 18  $C_l$  Distribution of KWA009-127

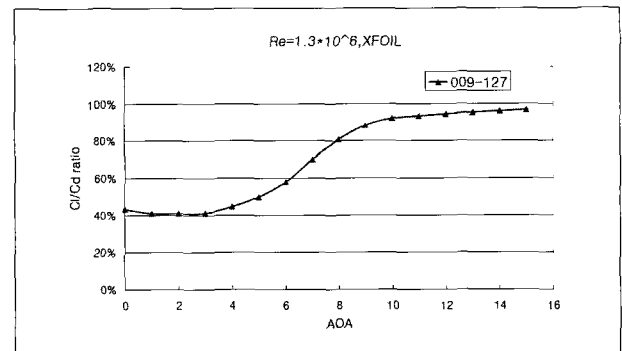


Fig. 22 Roughness Insensitivity of KWA009-127

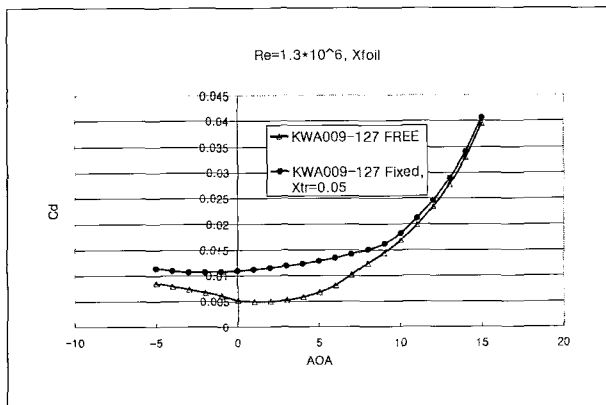


Fig. 19  $C_d$  Distribution of KWA009-127

개발된 KWA009-127 익형은 풍력발전기 팁 부분용 익형으로 해외에서 개발된 NREL의 S820<sup>®</sup> 및 NACA4412와 그 성능을 XFOIL을 이용하여 비교 분석하였다. Fig. 22는 각각의 익형들에 대한 형상을 비교한 그림이다.

다음의 Fig. 24는 그 결과를 도시하고 있으며, KWA009-127이 가장 우수한 양항비를 갖는 것으로 나타난다. 또한 표면 거칠기 변화에 대한 둔감도는 다른 두 개의 익형과 유사한 분포를 갖는다.

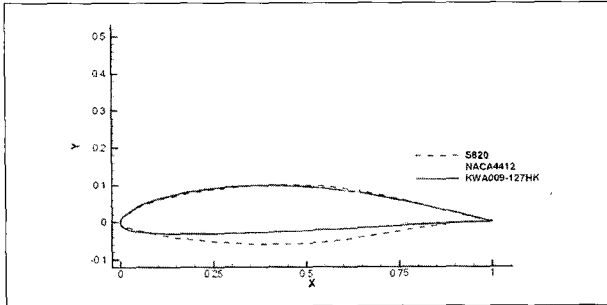
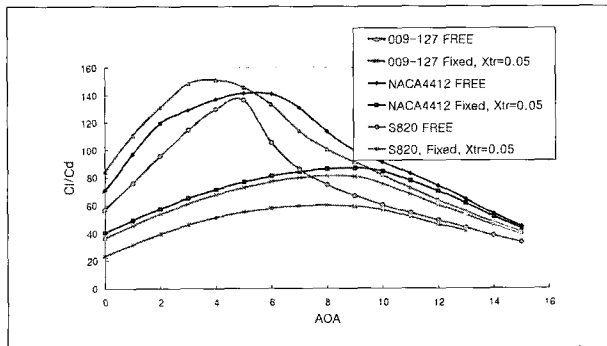
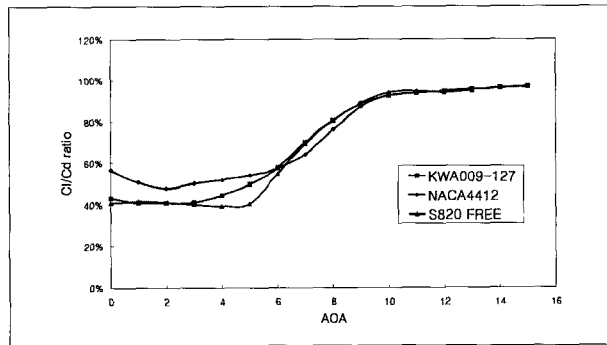


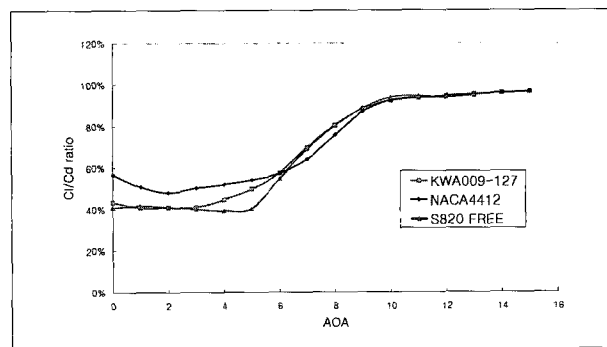
Fig. 23 Geometry Comparison



(a) Cl vs. Cd Ratio



(b) Roughness Insensitivity



(c) Transition Points

Fig. 24 Comparison of Aerodynamic Performances between KWA009-127, S820 and NACA4412

## 4. 결론

한국에너지기술연구원 풍력발전연구단에서는 풍력발전기 회전날개의 팁 및 루트부 적용을 위한 2종의 익형을 개발하였다.

익형의 개발에 있어 가장 중요하게 고려된 요소는 표면거칠기 변화에 따른 공력성능 저하 방지이며, 이를 위해 표면거칠기 둔감도를 80% 이상으로 설정하였다. 또한 외국에서 풍력발전기용으로 개발한 익형들의 공력성능 분석을 통해 루트 및 팁 부분용 익형의 양항비를 각각 100 및 140 이상으로 설정하였다.

최종적으로 개발된 익형은 루트용 익형 KWA005-240과 팁용 익형 KWA009-127이다. 루트 익형 KWA005-240의 경우 레이놀즈 수 1,000,000에서 최대 Cl이 1.65, 최대 양항비가 108이며 표면거칠기에 둔감도는 80%이었으며, 팁 익형 KWA009-127은 레이놀즈 수 1,600,000에서 최대 Cl 1.6, 최대 양항비 140을 나타내며, 표면거칠기 둔감도는 97%을 달성했다.

보다 객관적인 성능비교를 위하여 해외 개발 익형인 S814, DU91-W2-250 및 S820, NACA4412 등과 공력성능을 XFOIL을 이용하여 비교 검토한 결과 Cl 및 양항비의 경우 유사한 성능을 갖는 것으로 분석되었으며, 특히 팁용 익형 KWA009-127은 매우 우수한 표면거칠기 둔감도를 갖는 것으로 나타났다.

그러나 공력성능 분석을 위해 사용된 XFOIL은 Post Stall 조건에서는 그 예측 정확도가 현저히 저하하는 문제점을 지니고 있으며, 이는 현재 해외에서 풍력발전기 회전날개 성능해석을 위해 개발 중이거나 상용화된 여타 분석프로그램들도 동일한 문제점을 지니고 있다. 따라서 보다 정확한 분석은 익형 모델에 대한 풍동실험을 통해서 도출될 수 있다. 본 연구팀에서는 2007년 7월 개발 익형에 대한 풍동실험을 완료하였으며 현재 측정자료에 대한 분석 작업이 진행 중이다. 따라서 보다 정확한 개발 익형에 대한 성능자료는 분석작업이 완료되는 2007년 가을 발표 예정이다.

## 5. 후기

본 연구는 한국에너지기술연구원 자체 기본연구사업의 일환으로 수행되었습니다.



References

[1] Franck Bertagnolio, Niels Sorenson, Jeppe Johansen, Peter Fuglsang, 2001, "Wind Turbine Airfoil Catalogue" RISOE National Laboratory, RISOE-R-1280.  
 [2] Kristian S. Dahl, Peter Fuglsang, 1998, "Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISO-A-XX" RISOE National Laboratory, RISOE-R-1024  
 [3] P. Giguere, M.S. Selig, J.L. Tangler, 1999, "Blade Design Trade-Offs using Low-Lift Airfoils for Stall Regulated HAWTs" ASME/AIAA Wind Energy Symposium

[4] R.P.J.O.M. van Rooij, W.A. Timmer, 2003, "Roughness Sensitivity Considerations for Thick Rotor Blade Airfoils" Transactions of the ASME, Vol.125, Nov.  
 [5] D.M. Somers, 2004, "The S814 and S815 Airfoils" NREL/SR-500-36292  
 [6] D.M. Somers, 2005, "The S819, S820, and S821 Airfoils" NREL/SR-500-36334

김석우



1988년 홍익대학교 기계공학과 공학사  
 1990년 홍익대학교 기계공학과 공학석사  
 1992년 Polytechnic University 항공우주공학과 공학석사  
 1996년 Rensselaer Polytechnic Institute 항공기계공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 책임연구원  
 (E-mail : wemins@kier.re.kr)

신형기



1998년 서울대학교 항공우주공학과 공학사  
 2000년 서울대학교 기계항공공학부 공학석사  
 2005년 서울대학교 기계항공공학부 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단 선임연구원  
 (E-mail : hkeewind@kier.re.kr)

장문석



1984년 한양대학교 기계공학과 공학사  
 1986년 한양대학교 대학원 기계공학과 공학석사  
 1994년 한양대학교 대학원 기계공학과 공학박사

현재 한국에너지기술연구원 풍력발전연구단장  
 (E-mail : msjang@kier.re.kr)