

## 풍력블레이드용 에어포일세트의 설계 및 해석

신 형기<sup>1)</sup>, 김 석우<sup>2)</sup>

### Design and analysis fo wind turbine airfoils

Hyunki Shin, Seokwoo Kim

**Key words** : wind turbine(풍력발전기), blade(블레이드), airfoil(에어포일), inverse design (역설계), roughness sensitivity(표면 거칠기 민감도)

**Abstract** : In wind turbine blades, airfoils are required to have different spec when compared with airplane airfoil. Airfoils for wind turbine blade must have a high lift-to-drag ratio, moderate to high lift and especially low roughness sensitivity. Also an operation Re. No.s are lower than conventional airplane airfoils. At mid-span and inboard region, structural problems have to be considered. Especially, for stall regulated type, moderate stall behavior is essential part of design. For these reasons, airfoil design for HAWT blade is essential part of blade design. In this paper, root airfoil and tip airfoil are discussed. For a root region, 24% thickness airfoil is designed and for a top region, 12% thickness ratio is done. A inverse design method and panel method are used for rapid airfoil design. In this paper, a design method, features of airfoil shape and characteristics are discussed.

## 1. 서론

수평축 풍력발전기 블레이드의 루트에어포일과 팁에어포일에 대한 설계가 수행되었다. 풍력발전기 블레이드용 에어포일의 경우 기본적으로 항공기용 에어포일과 같이 높은 양항비를 기본적인 성능으로 요구한다. 이 외에도 낮은 레이놀즈수에서 운영되기 때문에 이에 대한 고려가 필요하며 실속제어형 풍력발전기의 경우 최대 양력값이나 양항비 보다는 실속 부근에서의 부드러운 실속 특성이 더 중요한 성능으로 요구된다. 또한 특히 풍력블레이드의 경우 지속적인 관리가 어렵기 때문에 대기중의 먼지, 곤충의 시체 등에 의한 오염이 계속적으로 이루어지며 이는 블레이드 표면의 거칠기를 증가시켜 성능저하를 가져온다. 따라서 풍력블레이드용 에어포일에서 가장 중요한 특징은 표면의 거칠기에 대해 민감하지 않은 에어포일을 설계하는 것이다<sup>2)</sup>. 이 외에도 루트 에어포일의 경우 시동 토크에 영향을 주기 때문에 양항비가 상대적으로 중요도가 덜하며 최대 양력 계수의 중요성이 더 크다고 할 수 있다<sup>1)</sup>. 또한 대부분의 하중을 블레이드 루트부가 받기 때문에 구조 설계를 고려하여 에어포일의 두께와 유효 두께비가 중요해 진다. 이와는 반대로 팁에어포일의 경우 높은 양항비가 요구 되지만 블레이드 루트부의 하중을 줄이기 위하여 낮은 양력

계수를 가져야 한다. 본 논문에서는 이러한 풍력블레이드의 루트부와 팁 부분의 에어포일의 설계에 대해서 다루고자 한다.

## 2. 에어포일 설계

### 2.1 설계 및 해석 방법

빠른 설계를 위하여 역설계(inverse design) 기법을 이용하여 에어포일 형상 설계가 수행되었다<sup>3,4)</sup>. 역설계 방법은 세세한 형상의 수정에는 어려움이 따르지만 설계자가 요구되는 성능에 적절한 에어포일의 압력 분포에 대해 물리적 통찰력을 가지고 있다면 빠른 설계를 가능하게 하는 방법이다. 이 논문에서는 XFOIL이 역설계의 툴로 이용되었다<sup>5)</sup>. 또한 에어포일 성능 해석은 기본적으로 XFOIL로 이루어 졌으며 이에 대한 보충으로 CFD 해석이 수행되었다. XFOIL이 경우 패널법과 경계층에 대해 경험식에 의한 수정이 이루어지는

1) 한국에너지기술연구원  
E-mail : hkeewind@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3748 Fax : (042)860-3543  
2) 한국에너지기술연구원  
E-mail : wemins@kier.re.kr  
Tel : (042)860-3568

방법을 기본으로 하고 있으며 많은 연구에서 설계 단계에서 적절한 결과를 보여주고 있다<sup>6)</sup>. 표면거칠기에 대한 민감도 해석은 XFOIL에서 경계층을 다루는 방법 가운데 강제 천이를 통하여 모사되었다. 블레이드 표면의 오염은 경계층이 더 이상 층류 경계층을 유지하지 못하고 에어포일 앞전 부근에서 난류로 천이 됨으로서 에어포일의 전체적인 성능에 영향을 미치게 된다. 이에 대한 모사로 앞전의 5% 위치에서 경계층이 강제로 천이를 일으키도록 해석을 수행하였다.

## 2.2 설계 목표 및 제한 조건

루트 에어포일과 팁 에어포일의 설계 조건이 표 1.에 명시되어 있다. 주요 설계 목표는 양력 계수, 양항비, 표면거칠기에 대한 민감도이다. 루트 에어포일의 경우 양력 계수는 시동 토크를 위하여 가능한 최대값을 가지도록 설계하며 반대로 팁에어포일의 경우 하중의 저감을 위하여 가능한 작은 값을 갖도록 설계한다. 양항비의 경우 역시 블레이드의 성능 향상을 위하여 가능한 크게 한다. 그러나 루트 에어포일의 경우 구조적인 이유로 두께가 두꺼워지기 때문에 큰 양항비를 가지기가 어렵다. 또한 전술한 바와 같이 표면 거칠기에 대하여 낮은 민감도를 가지도록 설계 목표를 정하여야 한다. 가장 중요한 제한 조건은 에어포일의 두께비이다. 또한 내부 구조물 설계를 위하여 유효 두께비가 90%이상 되도록 설계한다.

Airfoil	root	tip
Blade radial station	0.2	0.95
Reynolds number	$1.0 \times 10^6$	$1.3 \times 10^6$
thickness	0.24c	0.12c
Max lift coefficient	Above 1.2	below 1.2
Max L/D	Above 90%	Above 140
Roughness insensitivity	Above 60%	Above 60%
Effective t/c	Above 90%	Above 90%

표 1. airfoil design specifications

## 2.3 형상 설계

루트 에어포일의 경우 레이놀즈 수  $6 \times 10^5$ 에서  $2 \times 10^6$ 의 운전 범위를 갖으며 팁에어포일의 경우  $1.0 \times 10^6 \sim 1.7 \times 10^6$ 의 운전 범위를 갖는다. 그림 1은 역설계를 위한 에어포일 위의 Cp 분포를 보여주고 있다. 낮은 항력을 위하여 에어포일 위쪽면에서의 완만한 압력 구배가 요구된다. 또한 중간 위치에서 천이 램프가 위치하여 경계층에서 천이를 유도한다<sup>7)</sup>. 이상적으로는 층류 경계층이 적은 항력을 가지지만 낮은 표면거칠기에 대한 민감도를 가지기 위하여 빠른 천이를 일으켜 표면에서의 오염에 의해 전체적으로 난류 경계층이 되었을 때의 상황과 성능에서 적은 차이를 가지도록 하기 위하여 표면에서 빠른 천이를 유도한다. 고 받음각의 경우 앞전에서 큰 양력 피크가

존재한다. 이것 역시 빠른 천이를 유도하여 오염에 의한 성능 차이를 줄여준다. 그러나 이와 같은 표면 압력 분포는 에어포일의 양력을 감소시키게 된다. 루트에어포일의 경우 이를 보완하기 위하여 아랫면의 뒷전 부근에서 양력을 좀 더 발생시키도록 압력 분포가 만들어진다. 이러한 압력 분포는 양력을 증가시키는 이점이 있으나 모멘트를 증가시키는 단점이 있다. 그러나 루트 에어포일의 경우 이는 큰 문제가 되지 않는다.

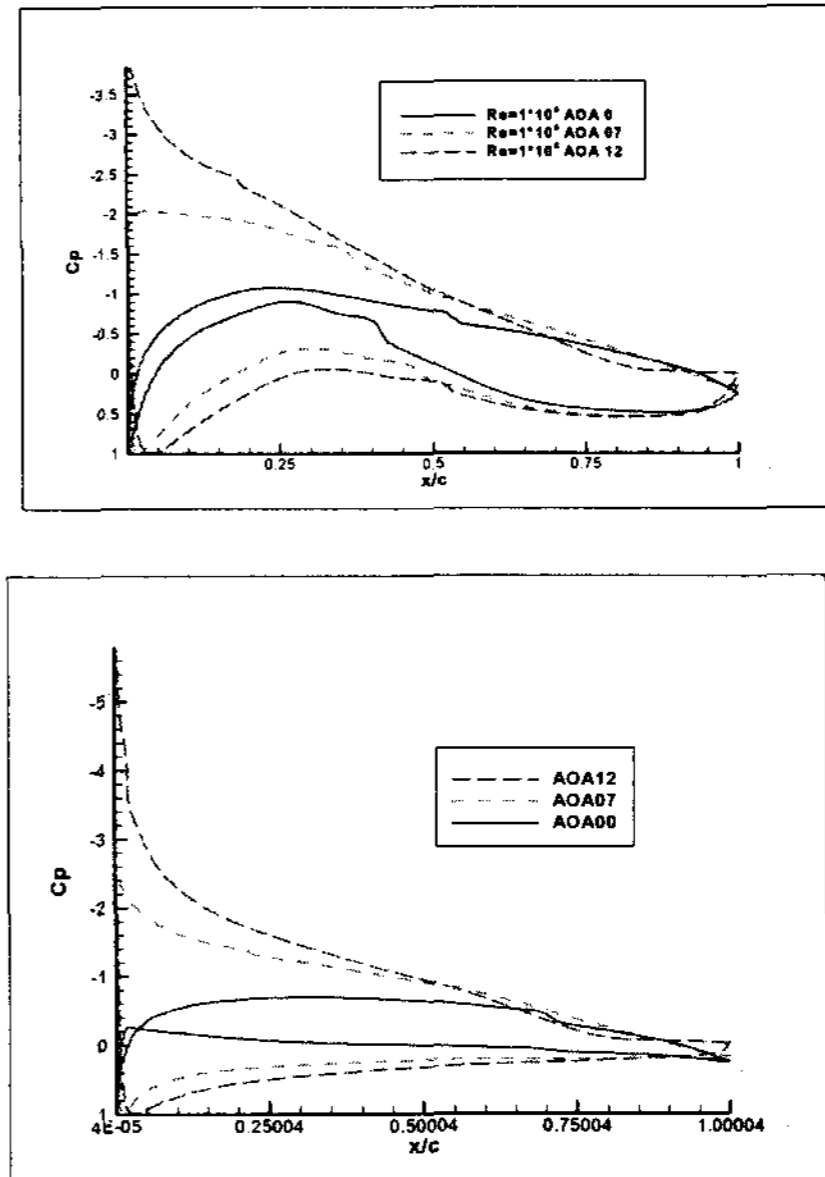


Fig. 1 pressure distribution

이와 같은 압력 분포에 의해 역설계 기법으로 만들어진 에어포일 형상은 그림 2에서 볼 수 있다. 주요한 형상의 특징으로는 낮은 위쪽 표면 높이와 상대적으로 뾰족한 앞전 형상, 그리고 루트 에어포일의 경우 S-tail 형상을 들 수 있다. 낮은 위쪽 표면 높이와 뾰족한 앞전은 이른 경계층 천이를 유발시키게 된다. 또한 S-tail은 부족한 양력을 보충하기 만들어진 것이다.

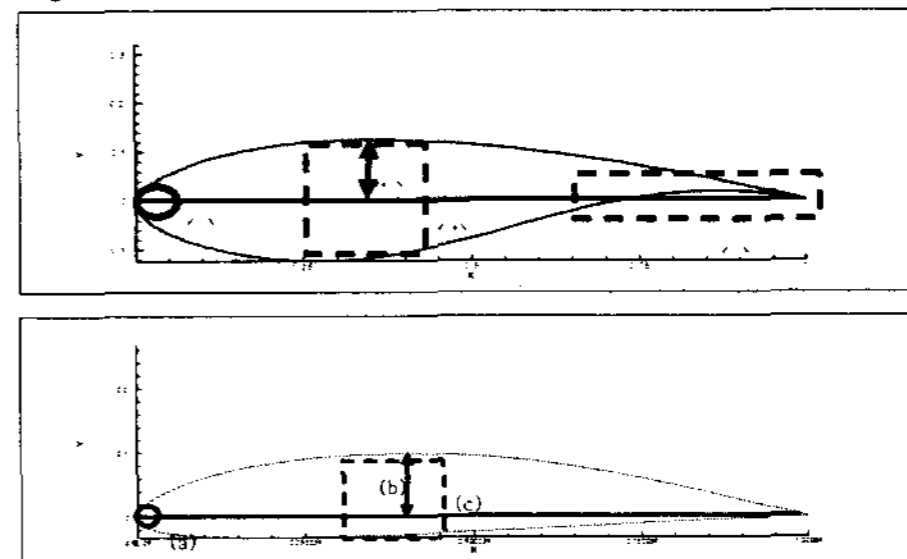


Fig. 2 airfoil geometry

## 2.4 성능 해석

설계 에어포일의 경우 성능 데이터의 1차적인 신뢰성 확보에 어려움이 있다. Xfoil의 경우 여러 연구에서 어느정도 결과에 대한 검증이 이루어졌으나 좀 더 나은 검증을 위하여 설계된 에어포일에 대하여 Fluent를 이용하여 CFD 해석을 수행하였다.

그림 3은 CFD해석을 위한 격자 형상 및 압력 분포에 대한 예시를 보여주고 있다. 격자는 C-type 격자가 사용되었으며, 난류 모델로는 k-epsilon, realizable 모델이 사용되었다. 벽면 함수는 standard wall function이 사용되었다.

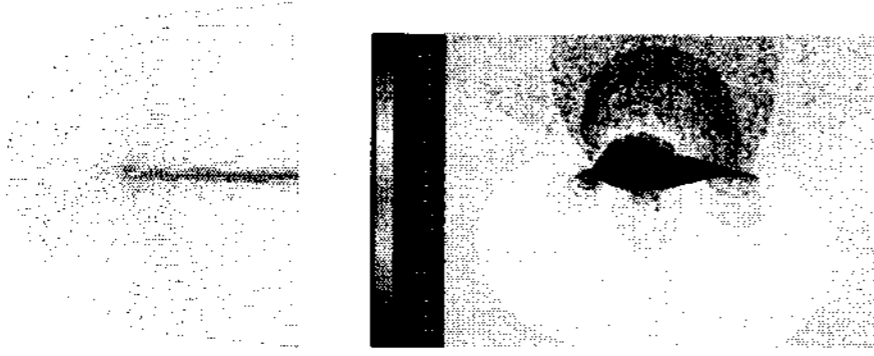


Fig. 3 그리드 형상 및 압력 분포(AOA=4, Re=1\*10<sup>6</sup>)

그림 4는 XFOIL과 Fluent의 계산 결과를 보여준다. 정확한 검증을 위해서는 풍동 실험과의 비교가 필요하지만 설계단계에서 이는 불가능하므로 XFOIL과 FLUENT만의 비교를 수행하였다. 그림에서 보는 것과 같이 설계단계에서 적용하기에는 큰 무리가 없는 결과를 보여준다.

그림 5는 설계된 에어포일의 성능을 보여준다. 모든 계산은 XFOIL로 수행되었다. 루트 에어포일의 경우 최대 양력 계수는 1.6이상으로 기존에 존재하는 에어포일에 비해 우수한 성능을 보여주며 양항비 역시 108이상으로 충분한 성능을 보여준다. 표면 거칠기에 대한 민감도 역시 기본적으로 50%이상이며 받음각이 커지면 70% 이상으로 좋아진다.

팁 에어포일의 경우 최대 양항비가 150이상이며 거칠기에 대한 민감도가 90%이상으로 좋아지기 때문에 상당히 우수한 에어포일임을 알 수 있다.

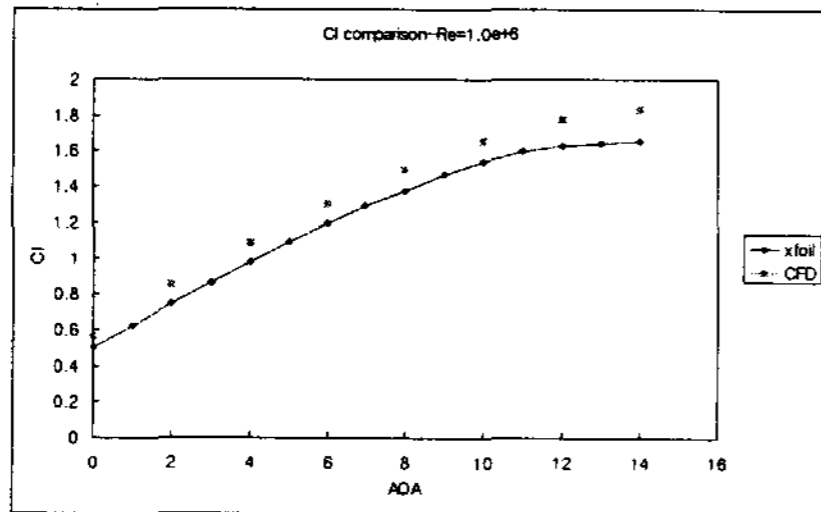
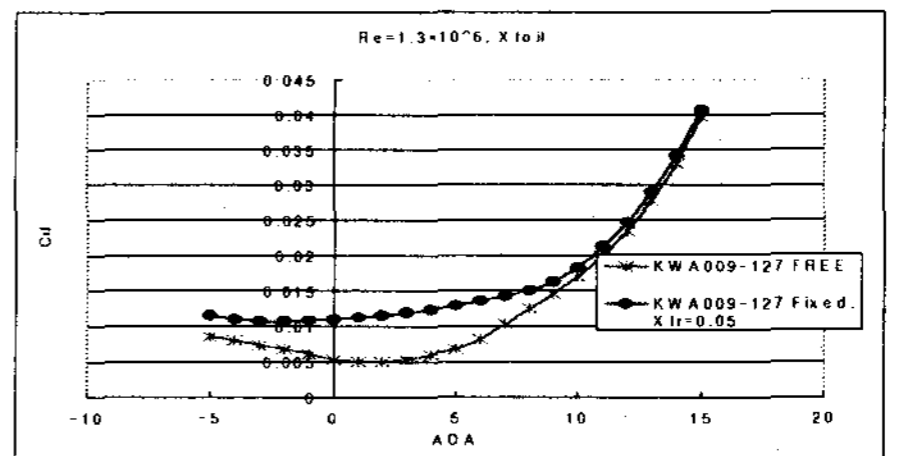
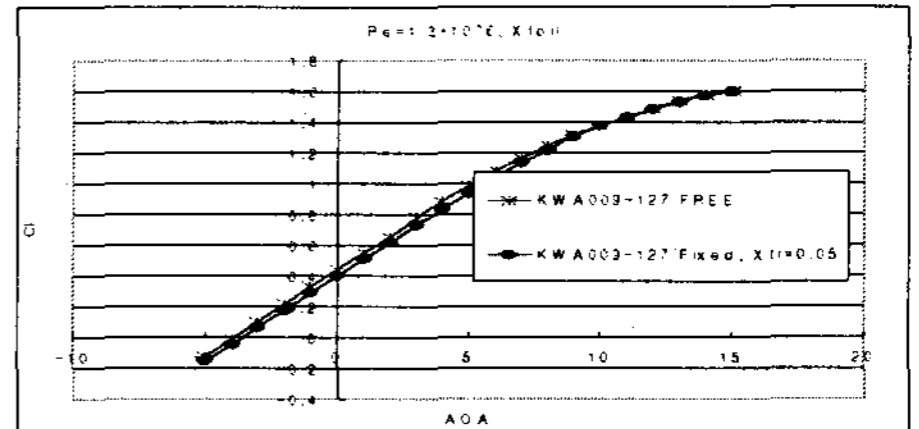
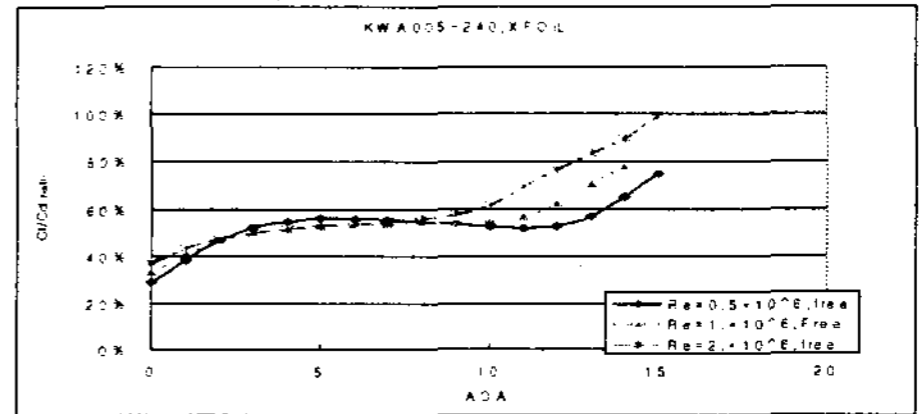
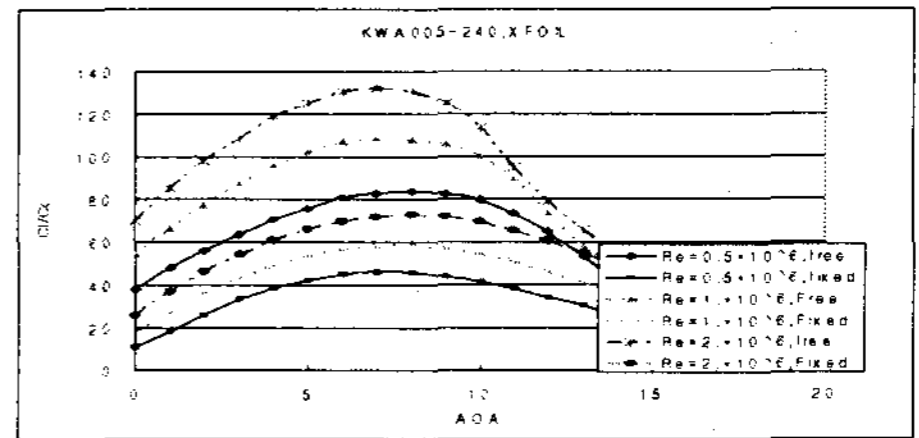
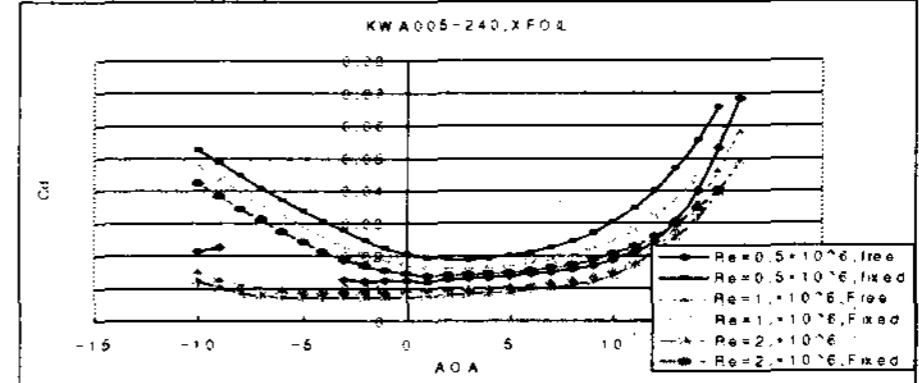
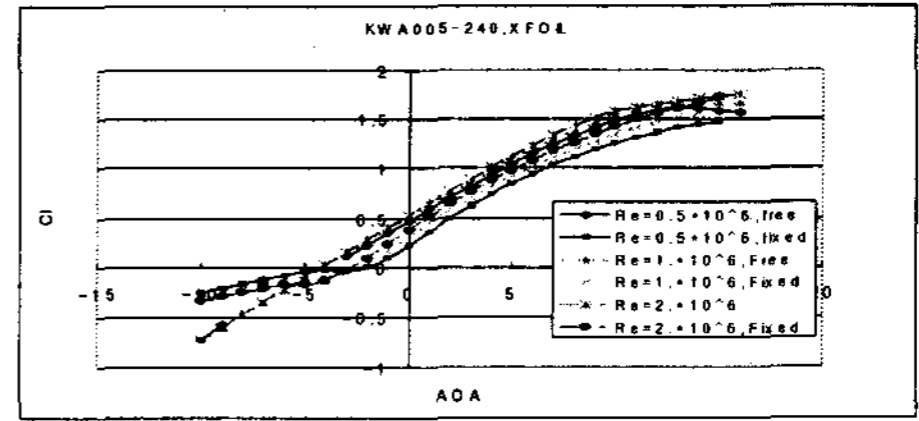


Fig. 4 Cl comparison



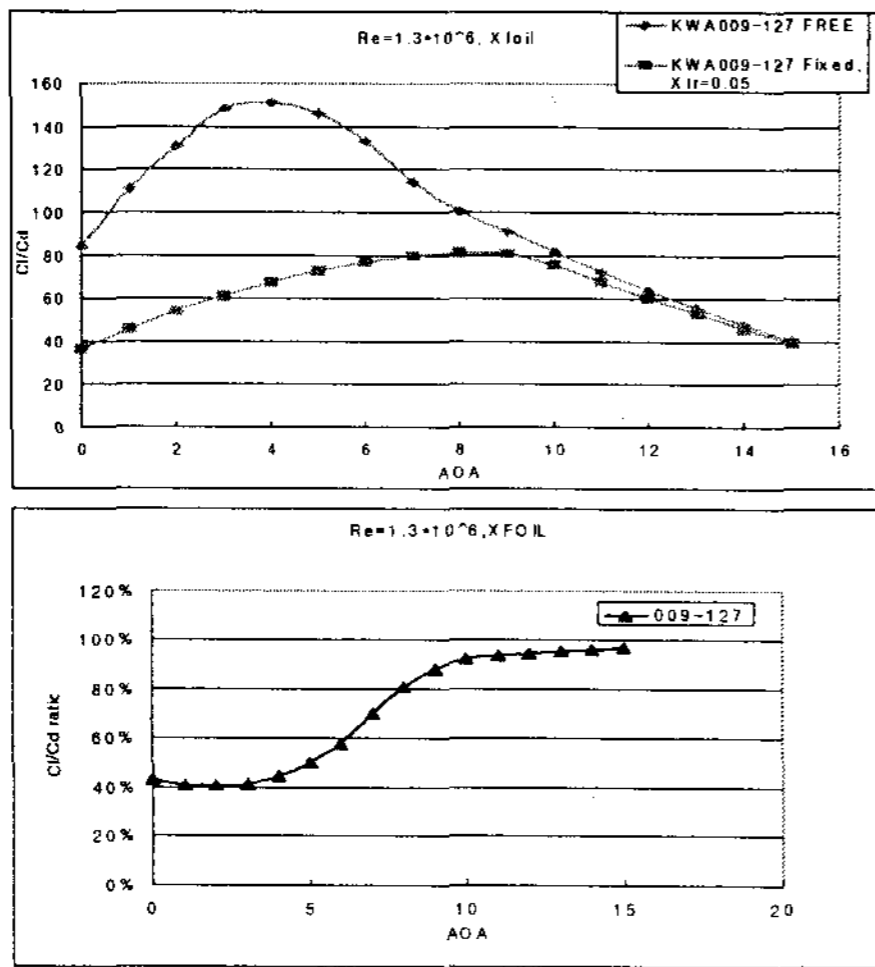


Fig. 5 airfoil performance

다음 그림은 S814 에어포일과 DU91-W2-250 에어포일과의 비교를 보여준다. 결과는 모두 XFOIL로 계산되었다. S814의 경우 두께비가 24%이며 DU91-W2-250은 두께비 25%로 모두 본 논문에서 설계된 에어포일과 거의 같은 두께비를 갖는다.

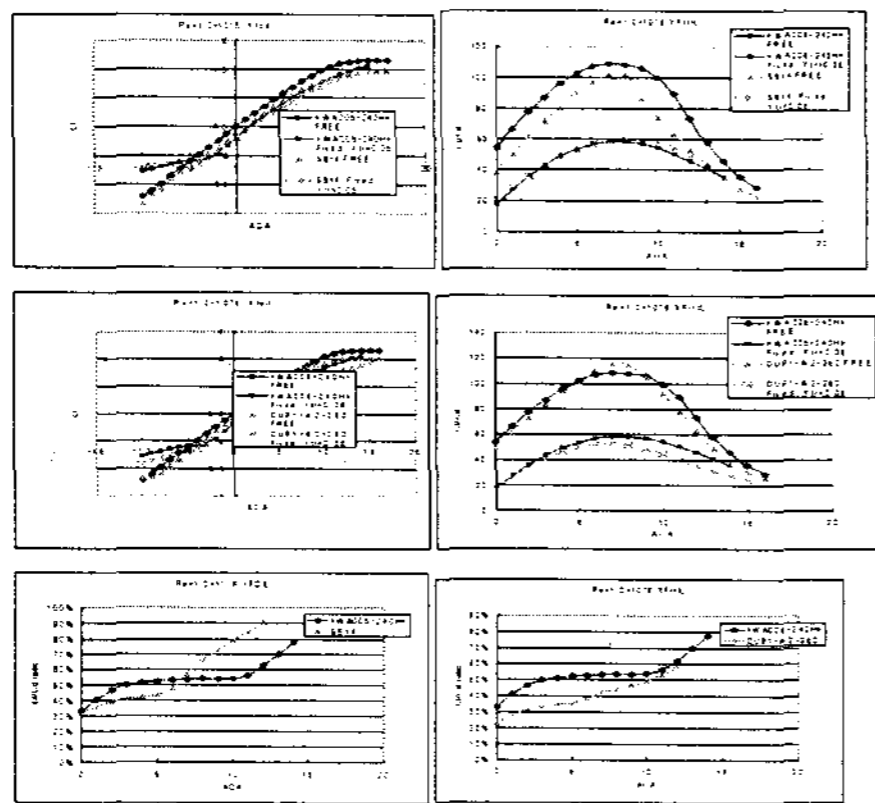


Fig. 6 S814, DU91-W2-250와의 비교

S814와의 비교에서 설계된 에어포일이 Cl 값과 양항비에서 모두 우수한 특성을 갖는다. 그러나 S814의 경우 상당히 우수한 표면거칠기에 대한 민감도 특성을 갖는다. 이는 S814가 실속 제어용 블레이드에 상당히 특화된 에어포일이기 때문이다. 그러나 S814의 경우 최대 양항비의 폭이 좁기 때문에 블레이드 설계시 좋은 성능을 기대하기는 어렵다. DU 에어포일과의 비교시 Cl은 설계된 에어포일이 우수한 특성을 갖지만 최대 양항비에서 약간 떨어지는 특성을 보인다. 그러나 표면거칠기에 대한 민감도 특성이 상당히 우수하며

또한 최대 양항비가 유지되는 받음각 영역이 상대적으로 넓다. 따라서 설계된 에어포일의 경우 S814나 DU91-W2-250과 같은 기존에 설계된 루트 에어포일에 비해서도 우수한 특성을 가지며 최대 Cl 값이 우수하며 최대 양항비 영역이 넓기 때문에 시동토크와 블레이드의 안정적인 성능에서 우수한 특성을 보일 것으로 예상된다.

### 3. 결론

본 연구에서는 풍력 블레이드의 루트와 팁 에어포일로서 두께비 24%, 12%의 에어포일을 설계하였다. 설계를 위해서는 역설계 기법이 이용되었으며 해석은 XFOIL을 통하여 주로 이루어졌다. 설계된 에어포일의 형상을 살펴보면 오염에 대한 표면 거칠기 변화에 대한 민감도에 따른 성능 변화를 줄이기 위해 이른 천이를 일으키기 위하여 에어포일의 윗면 두께가 상대적으로 얇게 되며 이의 형상 특성과 두께에 의한 영향으로 떨어진 에어포일의 양력 계수를 보충하기 위해 S-tail 형상을 가지게 된다. 또한 기존의 다른 에어포일과 비교하여도 우수한 특성을 나타내고 있다. 따라서 본 논문에서 설계된 에어포일은 외국의 라이선스 비용을 지불하고 사용하여야 되는 에어포일을 대체하고 우수한 성능의 블레이드 설계에 이용될 수 있으리라 기대된다.

### 후기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 연구비 지원을 통하여 수행 되었으며 본 논문의 에어포일에 대한 사항은 특허 출원중임을 밝힙니다.

### 참고 문헌

- [1] Kristian S. Dahl and Peter Fuglsang, Design of the Wind Turbine Airfoil Family RISO-A-XX, Riso-R-1024, DEC. 1998.
- [2] R.P.J.O.M. van Rooij and W.A. Timmer, Roughness Sensitivity Considerations for Thick Rotor Blade Airfoils, Transactions of the ASME, Vol. 125, Nov. 2003
- [3] P.A. Henne, Applied Computational Aerodynamics, Progress in Astronautics and Aeronautics Vol. 125
- [4] Michael S. Selig and mark D. Maughmer, Multipoint Inverse Airfoil Design Method Based on Conformal Mapping, AIAA Journal Vol. 30, No. 5, May 1992
- [5] Mark Drela, XFOIL 6.94 User Guide, Dec. 2001
- [6] Franck Bertagnolio, Niels Sorensen, Jeppe Johansen and Peter Fuglsang, Wind Turbine Airfoil Catalogue, Riso-R-1280, Aug. 2001
- [7] D.M. Somers, The S819, S820, and S821 Airfoils, NREL/SR-500-36334, Jan. 2005