

## 외부 오염물 증착에 의한 풍력 터빈 날개 단면의 공력 성능 저하 예측

양 태 호, 최 재 훈, 유 동 옥, 권 오 준\*

한국과학기술원 항공우주공학과

### PREDICTION OF AERODYNAMIC PERFORMANCE LOSS OF A WIND TURBINE BLADE SECTION DUE TO CONTAMINANT ACCUMULATION

T.H. Yang, J.H. Choi, D.O. Yu and O.J. Kwon\*

Dept. of Aerospace Engineering, KAIST

*In the present study, the effects of contaminant accumulation and surface roughness on the aerodynamic performance of wind turbine blade sections were numerically investigated by using a flow solver based on unstructured meshes. The turbulent flow over the rough surface was modeled by a modified  $k-\omega$  SST turbulence model. The calculations were made for the NREL S809 airfoil with varying contaminant sizes and positions at several angles of attack. It was found that as the contaminant size increases, the degradation of the airfoil performance becomes more significant, and this trend is further amplified near the stall condition. When the contaminant is located at the upper surface near the leading edge, the loss in the aerodynamic performance of the blade section becomes more critical. It was also found that the surface roughness leads to a significant reduction of lift, in addition to increased drag.*

**Key Words :** 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics), 풍력 터빈 날개 단면(Wind Turbine Blade Section), 오염물 증착 (Contaminant Accumulation), 표면 거칠기(Surface Roughness), 공력 성능 저하(Aerodynamic Performance Loss)

### 1. 서 론

대부분의 풍력 터빈들은 운용이 시작되고 시간이 지나면 암석의 부스러기나 동식물들의 잔해로 인해 표면이 계속적으로 오염되어 초기의 매끈한 표면 상태로 운용되지 못한다. 이와 같은 오염물의 증착은 그 형태와 위치를 예측하기가 힘들 뿐만 아니라 블레이드 표면을 지나는 유동의 흐름을 예기치 못하게 변화시켜 공력 성능을 빈번하게 저하시키는 원인이 된다. 실제로 블레이드의 앞전 부근에 미세한 오염물이 증착 되면 최대 25%의 출력 손실을 일으킬 수 있다고 알려져 있다 [1]. 또한 풍력 터빈의 공력 저하는 오염물의 형태, 크기, 그리고 그 위치에 따라 달라지고 블레이드 단면의 형태에 따라

풍력 터빈의 공력을 치명적으로 저하시키는 오염물의 고유 위치가 존재한다는 연구 결과가 있다[2]. 이처럼 블레이드 표면에 외부 오염물이 증착되면 표면 형상이나 거칠기가 변하게 되고 처음의 매끈한 표면을 가진 블레이드와 비교했을 때 공력 성능이 크게 낮아지기 때문에 외부 오염물이 블레이드 공력 성능에 미치는 영향에 대한 정확한 선행 연구가 필요한 상황이다.

유동이 앞전 근처에서 박리되면 실속, 즉 양력의 감소가 일어나는데 특히 오염물이 증착되어 앞부분의 형상이 두꺼워지면 실속이 쉽게 일어나게 되고 풍력 터빈의 공력 성능이 크게 저하된다. 90년대까지의 풍력 터빈 공력 해석은 BEMT (Blade Element Momentum Theory)에 경험을 통해 얻은 실증적인 지식들이 더해져 이루어져 왔다. 하지만 이와 같은 방법은 앞전 박리에 대한 해석이 취약하기 때문에 풍력 터빈의 공력 성능을 정확하게 예측하기 힘들었다. 2000년대에 들어서 Navier-Stokes 방정식을 기반으로 한 CFD 기술이 풍력 터빈의 공력 해석에 이용되면서 보다 정확한 예측이 가능해졌다. 하지만 최근까지도 풍력 터빈의 공력 해석에 외부 오염물에 의

Received: February 8, 2013, Revised: February 28, 2013,  
Accepted: February 28, 2013.

\* Corresponding author, E-mail: ojkwon@kaist.ac.kr  
DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.1.091>

© KSCFE 2013

한 효과가 고려된 연구 사례는 드물게 존재한다.

본 연구에서는 이차원 비정렬 격자 유동 해석 코드를 이용하여 블레이드 표면에 증착되는 오염물이 풍력 터빈 날개 단면의 공력 성능에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 특히 오염물의 크기와 그 위치에 따라 다양한 블레이드 형상을 모델링하고 각각의 경우에 대해 받음각을 증가시키면서 양력과 항력을 계산하여 오염물의 크기와 위치가 공력 성능 저하에 미치는 영향에 대해 관찰하였다. 이와 함께  $k-\omega$  SST 난류 모델을 확장하여 풍력 터빈 날개 단면에 표면 거칠기를 적용하고 표면 거칠기가 양력과 항력에 주는 영향에 대한 연구를 수행하였다.

## 2. 수치 해석 방법

### 2.1 지배방정식

본 연구에서는 이차원 Navier-Stokes 방정식을 이용하여 풍력 터빈 날개 단면 주위의 점성 유동장을 해석하였다. 이차원 Navier-Stokes 방정식은 질량 보존, 운동량 보존, 그리고 에너지 보존식을 포함하고 있으며 열전달과 외력이 없는 단열과정에 대해 다음과 같이 적분형으로 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int \int_{\Omega} Q dA + \int_{\partial\Omega} F(Q) \vec{n} dL = \int_{\partial\Omega} G(Q) \vec{n} dL \quad (1)$$

$$Q = [\rho \quad \rho u \quad \rho v \quad E]^T \quad (2)$$

속도 성분  $u$  와  $v$  는 각각  $x$  와  $y$  방향의 속도를 나타내며  $E$  는 제어체적 내부의 전체 에너지를 의미한다.

### 2.2 수치적 방법

#### 2.2.1 격자점 중심 기법

삼각형과 사각형으로 구성되는 혼합형 비정렬 격자를 사용하였고 격자점 중심의 기법을 사용하여 계산 공간을 분할하였다. 격자  $i$  의 면적 중심에 저장되는 격자 평균 변수는 다음과 같이 계산된다.

$$Q_i = \frac{1}{A_i} \int \int_{A_i} Q dx dy \quad (3)$$

지배방정식은 격자의 경계면을 가로지르는 알짜 플럭스를 이용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{d}{dt} (Q_i A_i) + C_i = 0 \quad (4)$$

$$C_i = \int_{\partial A} F(Q) \vec{n} dL - \int_{\partial A} G(Q) \vec{n} dL \quad (5)$$

비점성 플럭스  $F(Q) \vec{n} dL$  은 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting) 기법을 통해 계산되었고 점성 플럭스  $G(Q) \vec{n} dL$  은 중앙차분법으로 계산되었다.

#### 2.2.2 비점성 플럭스 계산

비점성 플럭스를 계산하기 위해서 Roe의 FDS(Flux Difference Splitting) 기법을 사용하였고 격자의 경계면  $k$  를 지나는 플럭스는 다음과 같이 계산된다.

$$F_k = \frac{1}{2} [F(Q_L) + F(Q_R) - |\tilde{A}| (Q_R - Q_L)]_k \quad (6)$$

$Q_L$  과  $Q_R$  은 각각 경계면을 기준으로 왼쪽과 오른쪽의 유동 변수를 나타내며 행렬  $\tilde{A}$  는 다음과 같이 계산된다.

$$\tilde{A} = A = \frac{\partial F}{\partial Q} \quad (7)$$

다음과 같이 왼쪽과 오른쪽의 유동 변수들을 이용하여 Roe-averaged 변수들이 계산된다.

$$\tilde{\rho} = \sqrt{\rho_L \rho_R} \quad (8)$$

$$\tilde{u} = \frac{u_L + \tilde{\rho} u_R}{1 + \tilde{\rho}} \quad (9)$$

$$\tilde{v} = \frac{v_L + \tilde{\rho} v_R}{1 + \tilde{\rho}} \quad (10)$$

$$\tilde{H} = \frac{H_L + \tilde{\rho} H_R}{1 + \tilde{\rho}} \quad (11)$$

$$\tilde{a}^2 = (\gamma - 1) \left( \tilde{H} - \frac{1}{2} (\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2) \right) \quad (12)$$

#### 2.2.3 점성 플럭스 계산

점성항을 계산하기 위해서는 격자의 경계면에서의 속도와 온도의 미분값이 필요하다. 이 유동 변수들의 미분값은 Green-Gauss 정리를 통해 다음과 같이 계산된다.

$$\nabla Q_n = \frac{1}{A_{\Omega}} \oint_{\partial\Omega} Q \vec{n} dL \quad (13)$$

격자의 경계면에서의 점성항은 인접한 격자들에 대한 값을

평균한 값으로 결정한다.

2.2.4 Reconstruction 기법

비점성 플럭스를 계산하는데 있어서 고차의 정확도를 얻기 위해 MUSCL 방법을 비정렬 격자계에 도입하여 사용하였다. 격자점에서의 gradient는 Green-Gauss 정리를 사용하는 방법과 least-square 방법을 사용하여 계산하였다.

2.3 난류 모델과 표면 거칠기

2.3.1  $k-\omega$  SST 모델[3]

$k-\omega$  SST 모델은 Menter에 의해 고안된 난류 모델로 두 개의 난류 유동 변수에 대한 수송 방정식을 사용하는  $k-\omega$  난류 모델과  $k-\epsilon$  난류 모델이 결합되어 만들어졌다.  $k-\epsilon$  난류 모델은 경계층 근처의 반류 영역이나 전단층 영역에서 높은 정확도를 갖는 장점이 있지만 경계층 내부에서는 해의 정확도를 유지하기 어렵다는 단점이 존재한다. 반면에  $k-\omega$  난류 모델은 경계층 내부에서의 계산이 용이하기 때문에 혼합 함수  $F_1$ 을 도입하여 경계층을 기준으로 내부의 유동은  $k-\omega$  모델을 통해 해석하고 이외의 영역은  $k-\epsilon$  모델을 통해 해석하도록 만들어졌다.  $k-\omega$  SST 난류 모델은 난류 유동에너지와 난류 소산률(turbulent dissipation rate)을 유동 변수로 하는 두 개의 방정식을 풀어서 난류 점성도를 계산한다.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\rho k] + \frac{\partial}{\partial x_j} [\rho u_j k] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{(\mu_l + \sigma_k \mu_t)}{(\mu_l + \sigma_\omega \mu_t)} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] = \left[ \frac{P_k - D_k}{\nu_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] \quad (14)$$

2.3.2  $\gamma-\widetilde{Re}_{\theta t}$  천이 모델[4]

$\gamma-\widetilde{Re}_{\theta t}$  천이 모델은 Langtry와 Menter에 의해 개발된 난류 모델로  $k-\omega$  SST 난류 모델에 간헐성(intermittency)과 천이 발생 기준을 나타내는 운동량 두께 레이놀즈수에 대한 두 개의 수송 방정식이 조합된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[ \frac{\rho \gamma}{\rho \widetilde{Re}_{\theta t}} \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{\rho u_j \gamma}{\rho u_j \widetilde{Re}_{\theta t}} \right] - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \frac{(\mu_l + \frac{\mu_t}{\sigma_f}) \frac{\partial \gamma}{\partial x_j}}{\sigma_{\theta t} (\mu_l + \mu_t)} \frac{\partial \widetilde{Re}_{\theta t}}{\partial x_j} \right] = \left[ \frac{P_\gamma - D_\gamma}{P_{\theta t}} \right] \quad (15)$$

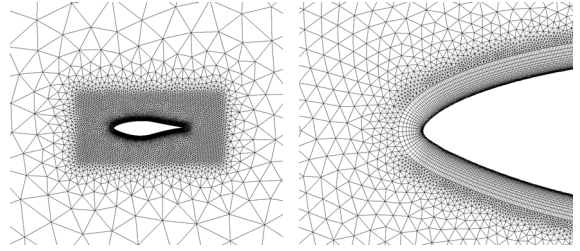


Fig. 1 Computational mesh

2.3.3 Rough-wall Flow를 위한 SST 난류 모델의 확장[5]

기존의  $k-\omega$  타입의 난류 모델에서 난류 소산률에 대한 경계조건을 적절히 부여하면 표면 거칠기를 모델링할 수 있다. Rough-wall flow에 해당하는 난류 소산률의 벽면 경계 조건은 다음 식과 같이 무차원 sand-grain height  $k_s^+ (\equiv u_\tau k_s / \nu)$ 에 대한 함수로 표현될 수 있다.

$$\omega_w = \frac{u_\tau^2}{\nu} S_R \quad (16)$$

$$S_R = \begin{cases} (50/k_s^+)^2 & \text{for } k_s^+ < 25 \\ 100/k_s^+ & \text{for } k_s^+ \geq 25 \end{cases} \quad (17)$$

표면 거칠기를 모델링하기 위해 위 식과 같은 경계조건을 기존의 SST 모델에 그대로 적용하면 roughness layer에서 표면의 거칠기 효과를 정확하게 예측하지 못한다. 이를 보완하기 위해 벽면 근처에서는 0이 되고 그 밖의 영역에서는 일정한 값을 가지는 새로운 switching function  $F_3$ 을 도입하여 eddy viscosity를 정의하였다.

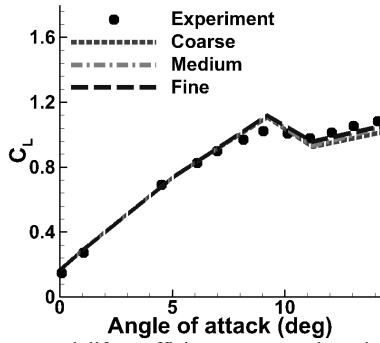
$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega; |\Omega| F_2 F_3)} \quad (18)$$

$$F_3 = 1 - \tanh \left[ \left( \frac{150\nu}{\omega d^2} \right)^4 \right] \quad (19)$$

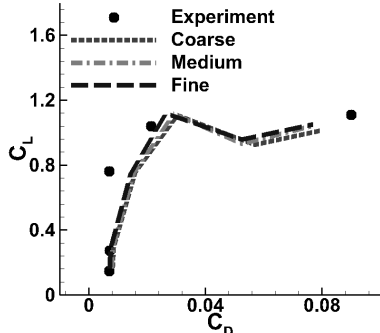
3. 결과 및 고찰

3.1 유동 해석 코드의 검증

이차원 유동 해석 코드의 검증을 위해 오염물의 증착과 표면 거칠기를 고려하지 않은 S809 날개 단면 주위의 점성 유동장을 해석하여 실험 결과[6]와 비교하였다. Fig. 1은 계산에 사용된 비정렬 격자계를 보여주고 있다. 블레이드 표면 위의 경계층 영역은 30개의 사각형 격자 층으로 분할하였고 이를 제외한 원방 영역은 삼각형 격자요소들로 분할하였다. Table 1



(a) computed lift coefficients at several angles of attack



(b) computed lift and drag coefficients

Fig. 2 Result of grid dependency test

과 같이 성감의 정도가 다른 세 가지 격자를 구성하여 각각의 격자에 대해 매끈한 S809 날개 단면에 대한 유동 해석을 수행하였으며 성감의 정도가 계산 결과에 미치는 영향에 대해 조사하였다. 레이놀즈수  $2.0 \times 10^6$ 에서 유동장의 해석을 수행하였으며 받음각을  $0.00^\circ, 1.02^\circ, 5.13^\circ, 9.22^\circ, 11.21^\circ, 14.24^\circ$ 로 증가시키면서 양력 계수와 항력 계수의 변화를 관찰하였다.

Fig. 2는 세 가지 격자를 이용하여 매끈한 S809 날개 단면에 대해 계산을 수행하여 얻은 결과를 실험 결과와 비교하여 보여준다. 세 가지 격자를 통해 얻은 계산 결과를 살펴보면 양력 계수와 항력 계수의 경향뿐만 아니라 실속 받음각의 크기 또한 실험 결과와 거의 비슷하게 예측해 낼 수 있다. 격자가 조밀해질수록 양력 계수나 항력 계수의 크기가 실제 실험 결과에 가까운 값으로 수렴하는 경향을 확인할 수 있었고 실속 받음각에 따른 양력과 항력의 변화 경향이 격자에 크게 의존하지 않음을 확인하였다.

Table 1 Computational grids for clean S809 airfoil

	Coarse grid	Medium grid	Fine grid
Grid point	32,038	39,614	60,435
Grid element	40,125	49,274	80,882

### 3.2 외부 오염물이 증착된 블레이드 단면

외부 오염물의 증착이 공력 성능 저하에 미치는 영향을 조사하기 위해 표면 거칠기에 의한 효과를 고려하지 않은 난류 천이 모델을 사용하여 오염물이 달라붙은 S809 날개 단면 주위의 유동장을 해석하였다. 외부 오염물에 의해 변화된 형상이 공력 성능에 미치는 영향을 보다 정확하게 해석하기 위해 유동 해석 코드의 검증에 사용했던 가장 조밀한 격자를 계산에 사용하였다.

외부 오염물이 증착되어 날개 단면의 형상이 달라지면 오염물에 의해 블레이드 표면 위를 흐르는 유동의 박리가 촉진되고 오염물이 박리되는 위치는 날개 단면의 공력 성능과 직접적인 관련이 있다. 이러한 이유 때문에 오염물의 위치가 유동이 박리되는 위치에 큰 영향을 주는 앞전 근처에만 오염물을 증착시켜 형상을 모델링하였다.

매끈한 블레이드를 제외하고 증착된 오염물의 크기와 그 위치가 다른 총 15가지의 변형된 블레이드 형상을 이차원 상에서 모델링하여 유동 해석에 사용하였다. Table 2는 날개 단면 형상들에 달라붙은 오염물의 위치와 그 크기를 보여준다. 블레이드 표면에 증착된 오염물은 Table 2와 같이 앞전, 앞전으로부터 코드 길이의 0.50%만큼 떨어진 위치의 윗면과 아랫면, 앞전으로부터 코드 길이의 1.25%만큼 떨어진 위치의 윗면과 아랫면에 해당하는 다섯 가지 위치 중 하나의 위치에 달라붙는다고 가정하였다. 또한 각각의 위치에 대해 코드 길이의 0.6%, 1.0%, 1.4%에 해당하는 크기의 오염물이 반원 모양의 형태로 증착된다고 가정하여 변형된 블레이드 형상을 모델링하였다. 이는 70 cm 정도의 코드 길이를 갖는 블레이드 단면이 대기 중에 각각 26개월, 43.5개월, 61개월 노출되었을

Table 2 S809 airfoils with contaminant accumulation

Name	Position		Height
CLEAN	None		0.0000c
DU125R03	Upper surface	0.0125c	0.0060c
DU125R05			0.0100c
DU125R07			0.0140c
DU050R03			0.0050c
DU050R05	0.0100c		
DU050R07	0.0140c		
DL000R03	Leading edge	0.0000c	0.0060c
DL000R05			0.0100c
DL000R07			0.0140c
DL050R03	Lower surface	0.0050c	0.0060c
DL050R05			0.0100c
DL050R07			0.0140c
DL125R03		0.0125c	0.0060c
DL125R05			0.0100c
DL125R07			0.0140c

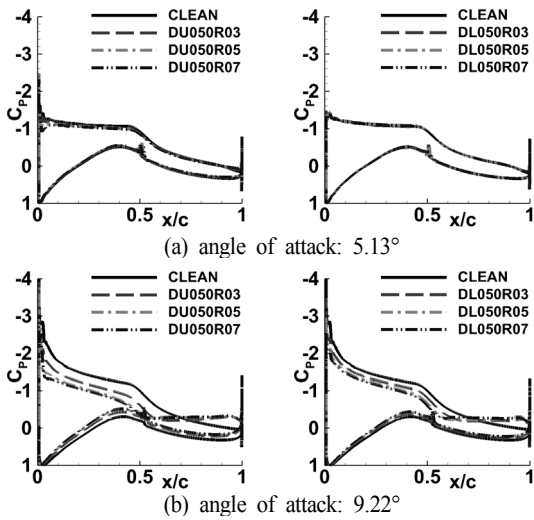


Fig. 3 Distribution of pressure coefficient along airfoil surfaces with varying contaminant sizes

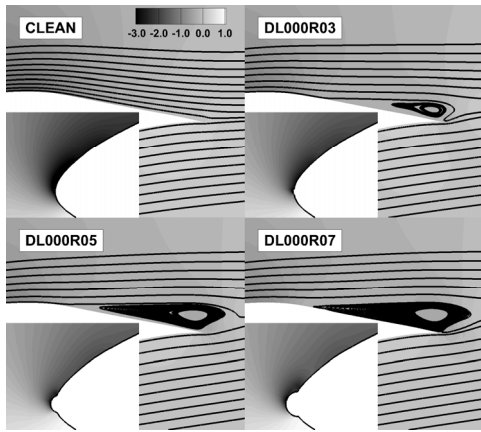


Fig. 4 Pressure and streamline distribution with varying contaminant sizes (angle of attack: 9.22°)

때 표면에 증착될 수 있는 분진의 크기이다[7]. 각각의 변형된 블레이드 형상에 대해 매끈한 S809 블레이드 단면 주위의 유동 해석과 동일한 운용 조건으로 계산을 수행하였다.

Fig. 3은 일정한 받음각에 대해 증착된 오염물의 크기와 그 위치가 압력 계수 분포에 주는 영향을 나타낸다. Fig. 3(a)에서 확인할 수 있듯이 실속 조건에 도달하기 전의 작은 받음각에 대해서는 오염물이 증착된 블레이드 단면의 압력 계수 분포가 매끈한 블레이드 단면과 비교했을 때 크게 달라지지 않았다. 증착된 오염물의 크기나 위치가 달라지는 경우에도 아랫면과 윗면의 압력 계수가 달라지지 않는 모습을 통해 실속 조건 이전의 작은 받음각 영역에서 운용되는 날개 단면

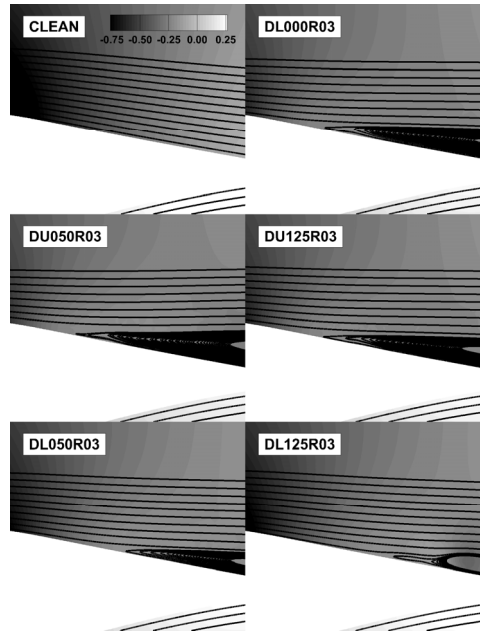


Fig. 5 Pressure and streamline distribution with varying contaminant positions (angle of attack: 9.22°)

은 오염물에 의한 공력 성능 저하가 거의 일어나지 않는다고 판단된다. 실제로 실속 조건 이전의 받음각 영역에서는 양력 계수와 항력 계수를 계산했을 때 오염물이 증착되어 블레이드의 형상이 변하여도 그 결과가 매끈한 블레이드 단면과 비교했을 때 큰 차이를 보이지 않음을 확인하였다.

실속 조건 근처의 큰 받음각 영역에 대해서는 오염물의 크기와 위치에 따라 블레이드 단면 위의 압력 분포가 달라진다. 정체점 근처에 위치한 오염물은 그 위치에 관계없이 아랫면의 압력 분포에는 큰 영향을 주지 못하는 데 비해 윗면의 압력 계수를 크게 변화시키는 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 계산 결과는 유선 분포를 통해 확인할 수 있는 것처럼 정체점 근처의 오염물이 아랫면 위를 흐르는 유동의 흐름은 바꾸지 못하지만 윗면 위를 흐르는 유동의 바리를 촉진시켜 윗면 주변의 압력을 증가시키는 사실과 관련이 있다. 블레이드 표면에 증착된 오염물은 윗면의 압력을 증가시키고 이로 인해 아랫면과 윗면 사이의 압력 차이가 줄어들어 양력이 감소하게 된다. 또한 오염물이 앞전으로부터 가장 멀리 떨어진 (0.0125c) 아랫면 위의 오염물을 제외한 나머지 경우에는 실속 받음각 근처의 양력이 매끈한 블레이드 단면과 비교했을 때 눈에 띄게 감소하였다.

Fig. 4는 날개 단면에 증착된 오염물의 크기가 앞전의 압력 분포에 주는 영향을 보여주고 있다. Fig. 3을 통해서 확인할 수 있듯이 오염물의 크기가 커질수록 아랫면과 윗면 위의



Fig. 6 Velocity distribution change due to contaminant accumulation (angle of attack: 9.22°)

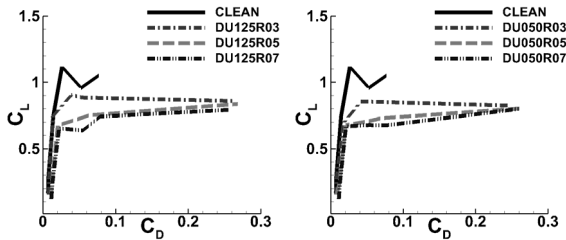


Fig. 7 Computed lift and drag coefficients for wind turbine blade sections with contaminant accumulation

압력 계수의 곡선이 이루는 면적이 점점 좁아진다. 이와 함께 오염물의 크기가 커질수록 유동이 윗면으로부터 박리되는 위치가 앞전에 가까워진다는 사실을 확인할 수 있는데 이는 상대적으로 크기가 큰 오염물이 작은 오염물에 비해 윗면 위를 흐르는 유동의 속도를 더 늦추기 때문이다. 블레이드 단면에 증착된 오염물의 크기가 커질수록 앞전 근처에서의 유속이 더 감소하고 그로 인해 결과적으로 양력이 감소하므로 풍력 터빈 블레이드의 공력 성능 또한 낮아진다고 판단할 수 있다.

Fig. 5는 증착된 오염물의 위치가 풍력 터빈 날개 단면 주위의 유동 흐름에 미치는 영향을 보여준다. 오염물의 위치가 풍력 터빈의 공력 저하에 미치는 영향은 유동이 박리되는 위치의 변화를 통해 설명이 가능하다. 일반적으로 외부의 오염물이 블레이드 표면에 증착되면 블레이드 표면이 돌출되어 그 주변의 유동 흐름이 바뀌게 된다. Fig. 6은 앞전 근처의 오염물이 블레이드 단면 주위를 흐르는 유동의 속도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 블레이드 단면 위를 지나는 유동이 돌출된 오염물을 지나게 되면 그림에서 확인할 수 있듯이 유속이 크게 감소하게 된다. 오염물이 앞전에 가까운 위치에 증착될수록 블레이드 표면을 흐르는 유동의 속도가 낮아지는 점이 앞당겨지고 블레이드 표면으로부터 박리되는 위치가 보다 앞전에 가까운 곳에 형성된다. Fig. 5를 보면 앞전 근처(윗면, 0.0050c)의 오염물이 유동의 박리를 가장 촉진시킨다는 사실을 확인할 수 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 7의 양력과 항력의 상관 곡선 그래프에서도 찾아볼 수 있다. 따라서 앞전 근처

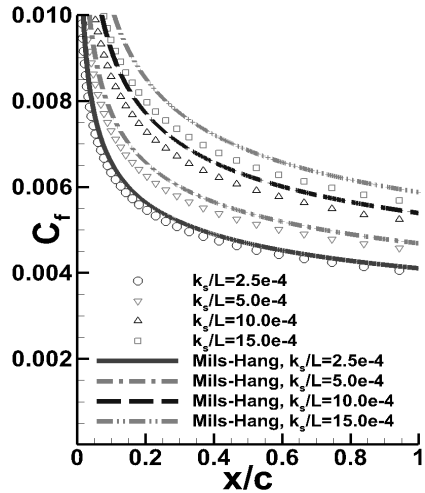


Fig. 8 Computed skin-friction coefficients for rough plates compared with the semiempirical formula

(윗면, 0.0050c)의 오염물이 다른 위치의 오염물에 비해 상대적으로 공력을 크게 저하시킨다고 결론지을 수 있다.

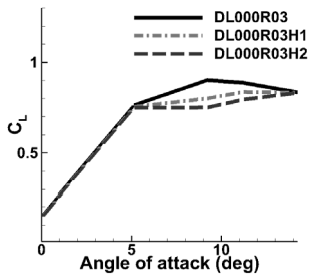
### 3.3 표면 거칠기가 적용된 블레이드 단면

수정된 SST 난류 모델의 검증을 위해 일정한 표면 거칠기를 갖는 평판에 대한 유동해석을 수행하였다. Fig. 8은 수정된 난류 모델을 적용하여 계산한 평판 위의 마찰 계수 분포를 나타낸다. 수정된 난류 모델을 통해 계산된 경계층 내부에서의 마찰 계수는 Mill and Hang의 실험식[8]을 통해 계산한 마찰 계수와 거의 일치하였다. 실험식과 계산된 결과를 살펴보면 표면 거칠기의 높이가 증가할수록 마찰 계수가 증가하는 경향을 확인할 수 있다.

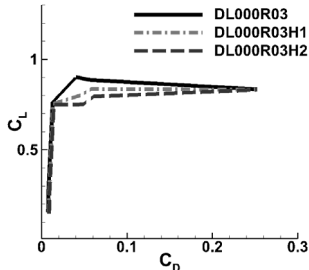
표면 거칠기가 풍력 터빈 블레이드 단면의 양력과 항력에 주는 변화를 관찰하기 위해 앞전에 코드 길이의 0.6%에 해당하는 크기의 오염물이 증착된 날개 단면을 사용하였다. 또한 오염물이 증착된 위치에 관계없이 전체 코드 길이를 기준으로 앞전으로부터 15%만큼 떨어진 위치까지 일정한 표면 거칠기를 적용하였다. Table 3과 같이 서로 다른 두 가지 표면 거칠기 높이에 대해서 계산을 수행하였으며 매끈한 S809 블레이드 단면의 해석에 사용된 동일한 운용 조건을 사용하였다.

Table 3 S809 airfoils with surface roughness

Name	Roughness height	Roughness area
DL000R03	$0.0000 \times 10^{-4}$	0.1500c
DL000R03H1	$1.0000 \times 10^{-4}$	
DL000R03H2	$2.0000 \times 10^{-4}$	



(a) computed lift coefficients at several angles of attack



(b) computed lift and drag coefficients

Fig. 9 Computational result for wind turbine blade sections with surface roughness

Fig. 9는 표면 거칠기가 적용된 날개 단면에 대한 해석 결과를 보여주고 있다. 표면 거칠기가 적용된 S809 날개 단면 주변의 유동장을 해석하면 표면 거칠기가 적용되지 않은 날개 단면과 비교했을 때 윗면 위의 압력 계수가 상대적으로 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 오염물이 증착되어 형상이 변했을 때와 마찬가지로 날개 단면에 적용된 표면 거칠기가 윗면 위를 흐르는 유동의 속도를 낮추고 유동의 박리 또한 앞당겨 양력을 감소시키는 결과를 낳았다. Fig. 9(b)의 양력과 항력의 상관 곡선을 살펴보면 표면 거칠기가 적용된 블레이드 단면은 표면 거칠기가 적용되지 않은 블레이드 단면에 비해 실속 조건 이후의 양력 계수가 감소하고 항력 계수가 증가함을 확인할 수 있다. 같은 운용조건에서 표면 거칠기의 높이가 증가할수록 양력이 더 감소하고 항력이 더 증가하는 경향이 관찰되었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 외부 오염물에 의해 변화된 형상과 표면 거칠기가 풍력 터빈 블레이드 단면의 공력 성능 저하에 주는 영향을 조사하였다. 블레이드 단면에 증착된 오염물은 날개 단면에 작용하는 양력을 감소시킬 뿐만 아니라 항력을 커지게 한다. 오염물의 크기가 커질수록 그 위치에 관계없이 윗면

근처의 압력이 증가하여 공력이 더 저하되었다. 오염물이 윗면의 앞전 근처에 증착되면 날개 단면 위쪽을 흐르는 유동의 속도가 크게 느려져서 유동이 블레이드 단면으로부터 쉽게 박리되고 블레이드 단면의 공력 성능이 더 낮아진다. 수정된 SST 난류 모델을 통해 S809 날개 단면에 대해 표면 거칠기를 적용하였고 표면 거칠기가 주변의 유동 흐름에 주는 영향을 조사하였다. 표면 거칠기가 적용된 블레이드 단면은 매끈한 날개 단면과 비교했을 때 실속 조건 이후의 계산 결과에서 뚜렷하게 나타나듯이 양력 계수가 감소하고 항력 계수가 증가하였다. 또한 표면 거칠기의 높이가 커질수록 상대적으로 양력이 낮아지고 항력이 증가하는 경향을 확인할 수 있었다.

#### 후 기

본 논문은 지식경제부 산업융합원천기술개발사업으로 지원된 연구결과입니다(10041117, 5MW급 해상풍력발전용 블레이드 손상감지 및 공력성능 운영관리를 위한 로봇 기술 개발).

#### 참고문헌

- [1] 2001, Corten G.P. and Veldkamp H.F., "Insects Can Halve Wind-turbine Power," *Nature*, Vol.412-6842, pp.42-43.
- [2] 2000, Lee, S., Kim, H.S. and Bragg, M.B., "Investigation of Factors that Influence Iced-airfoil Aerodynamics," *AIAA 2000-0099*, 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit.
- [3] 1994, Menter, F.R., "Two-equation Eddy Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications," *AIAA Journal*, Vol.32-8, pp.1598-1605.
- [4] 2009, Langtry, R.B. and Menter, F.R., "Correlation-based Transition Modeling for Unstructured Parallelized Computational Fluid Dynamics Codes," *AIAA Journal*, Vol.47-12, pp.2894-2906.
- [5] 1998, Antti, H. and Seppo, L., "Extension of  $k-\omega$  Shear-Stress Transport Turbulence Model for Rough-Wall Flows," *AIAA Journal*, Vol.36-9, pp.1728-1729.
- [6] 1997, Somers, D.M., "Design and Experimental Results for the S809 Airfoil," *NREL/SR-440-6918*.
- [7] 2007, Mohammed, G.K. and Aboelyazied, M.K., "Effect of Dust on the Performance of Wind Turbines," *Desalination*, Vol.209, pp.209-220.
- [8] 1983, Mills, A. and Hang, X., "On the Skin Friction Coefficient for a Fully Rough Flat Plate," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.105-3, pp.364-365.