

# EDISON\_CFD를 이용한 화성에서 운용 가능한 풍력터빈의 설계

김 동 현<sup>1</sup>, 박 상 우<sup>2</sup>, 정 상 준<sup>2</sup>

<sup>1</sup>충남대학교 지역환경토목학과

<sup>2</sup>충남대학교 기계설계공학과

## 초 록

본 논문은 EDISON\_CFD를 활용하여 화성에서 운용 가능한 풍력터빈에 대해 실험 및 개선 설계하였다. 본 연구에서는 화성의 중력 및 공기밀도 등 화성의 환경 데이터를 적용함으로써 풍력터빈의 형상을 새롭게 설계 하였다. 개선 설계는 기존의 풍력발전기 형상을 변형시키며 해석을 진행하였으며, 받음각과 형상에 따라 생성되는 토크를 확인하였다. 개선설계한 풍력터빈 모델은 단위 미터 당 약 8 W의 전력생산이 가능한 것을 확인하였다.

**Key Words :** 전산유체역학(CFD), 화성(Mars), 받음각(Angle of Attack), 양력계수(Lift Coefficient), 항력계수(Drag Coefficient), 수직축 풍력발전기(Vertical Axis Wind Turbine), 토크(Torque)

## 1. 서 론

화성은 태양계의 행성 중 지구와 가장 유사한 환경을 갖고 있어 인류가 거주할 수 있는 가능성이 가장 큰 행성이다. 1960년 이후 오늘에 이르기 까지 약 40여 차례의 화성탐사를 시도했으며, 이제 화성에 인류가 도착하기 위한 꿈에도 도전하고 있다. 이러한 탐사의 일환으로 2003년 화성으로 보내진, 무인탐사선 오퍼튜니티는 탐사 기간 동안 난관에 봉착하게 된다. 태양광에너지로 작동하는 탐사선은, 화성의 모래폭풍으로 태양광이 줄어들자 전력해결에 문제가 생겼다. 부족한 전력으로 인해 탐사시간이 줄어들거나, 구동전력이 충전되기까지 안전모드로 대기하는 등, 탐사선의 수명이 제한된 상황에서 치명적으로 다가왔다. 이러한, 전력문제는 무인탐사선에 그치는 것이 아니라, 앞으로 진행하게 될 탐사계획에 치명적인 문제로 이어질 것이다. 따라서 화성의 대기 환경에 맞는 전력문제 해결 대안이 필요할 것으로 보인다.

화성은 수년마다, 모래폭풍이 수 km에서 반구(hemisphere)에 이르는 규모까지 다양하게 발생한다. 화성의 모래폭풍은 대기에서 햇빛을 흡수하여 태양광 발전시스템에 문제를 일으킨다. 하지만 고고도에서 기온을 상승시키며, 저고도에서 기온을 떨어뜨림으로 인해 증가한 풍속은 풍력발전에 유리한 조건을 제공한다.

본 연구에서는 지구와는 다른 화성 대기환경에 적합한 풍력터빈 형태인 수직형 풍력발전기 중 풍향에 무관하며, 상대적으로 저 풍속에서도 발전이 가능한 자이로밀형(Gyromil) 풍력터빈을 기본으로 개선설계해 보도록 하겠다.

## 2. 연구방법

### 2.1 화성의 대기조건

해석이 이루어지는 유동 환경은 지구에서의 조건과 다르다. 화성의 환경에 대해서는 Table 1에서 확인할 수 있으며, 가장 큰 특징은 화성의 대기밀도는 지구보다 100배 낮다는 것이다. 또한, 풍속은 17 m/s 에서 최대 26 m/s 까지 상승한다. 이 자료를 바탕으로 본 실험에서는 풍속을 측정값의 중간인 20 m/s 로 적용 하였다.

Table 1 Atmosphere for Mars and Earth

	Mars	Earth	Units
Gravity	3.7	9.8	$m/s^2$
Gas constant	188	287	$J/kg \cdot K$
Air pressure	7	1373	$hPa$
Air density	0.015	1.2	$kg/m^3$
Temperature	220	300	$K$
Kinematic viscosity	0.001	0.00015	$m^2/s$

운동에너지 식 (1)을 이용하면,

$$\begin{aligned}
 E &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho V)v^2 \\
 &= \frac{1}{2}(\rho Atv)v^2 = \frac{1}{2}(\rho At)v^3 \quad (1)
 \end{aligned}$$

대기밀도  $\rho$ 는 1제곱인 반면에 풍속  $v$ 는 3제곱이기 때문에 화성의 낮은 대기밀도를 높은 풍속이 보상하여 풍력발전을 위한 충분한 에너지를 얻을 수 있다.

## 2.2 풍력터빈 모델 선정

화성의 모래폭풍은 특성상 풍향을 예측 할 수 없기 때문에 모든 풍향에서 작동 가능한 수직형 풍력발전기(VAWT)를 적용하였다. 수직형 풍력발전기는 적은 풍량에도 작동하고 수평형 풍력발전기보다 공간을 적게 차지하여 우주선에 탑재하기에 유리한 부가적인 장점도 있다. 화성의 대기를 기준으로 위 식 (1)을 적용하면  $15\text{ m}^2$  면적에 출력  $900\text{ W}$  가 계산된다. 따라서 실험에 사용할 기본 형상은  $900\text{ W}$  용 수직 H-Darrieus형 풍력발전기로 정하였다.

축의 직경은  $0.5\text{ m}$ , 블레이드 코드길이는  $1\text{ m}$ , 블레이드 높이는  $3\text{ m}$ , 로터의 직경은  $5\text{ m}$ , 풍력 발전기 높이는  $7\text{ m}$ 를 채택하였다(Figure 1).

해석모델 격자는 e-MEGA\_v3.4 를 사용하여 제작하였으며, 블레이드는 NACA0018을 사용했다. 경계조건으로는, 풍력터빈 형상은 Viscosity adiabatic wall조건을 주었으며, 풍속은 아음속인  $20\text{ m/s}$ 로 설정하였기 때문에, Subsonic inlet과 Subsonic outlet으로 설정했다. 블록간의 데이터 교환을 위하여 블록 경계에 Block communication 조건을 부여하였다(Figure 1). 또한, 해석의 정확도를 위해 Blasius boundary layer 식을 이용하여  $Y^+ = 0.00088964\text{ m}$ 의 값을 적용하였다. 식 (2).

$$Re_x = \rho u_0 x / \mu \quad (2)$$

해석 모델은 기본 형상(Normal 1 stage) 이외에 로터 축의 형상을 십자형태로 변환한 형상(Cross 1 stage), 후류의 영향을 관찰하기 위해 Airfoil 꼬리에 변화를 준 형상(Flap 1 stage)의 모델을 정하였다. 또한, 양력을 이용한 터빈의 성능향상을 위해, 복엽기(biplane)의 날개를 각 Case에 응용한 (Normal 2 stage), (Cross 2 stage), (Flap 2 stage)의 모델을 추가 실험하였다.

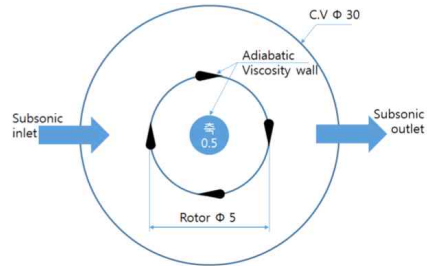
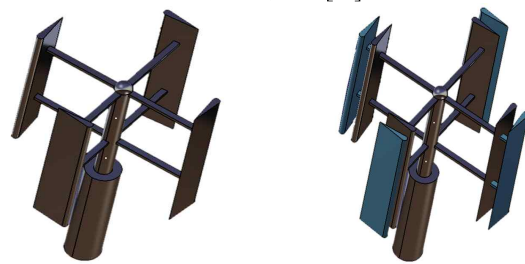


Figure 1 Boundary Condition of wind turbine [m]



a. 1 stage b. 2 stage

Figure

2 3D modeling of VAWT

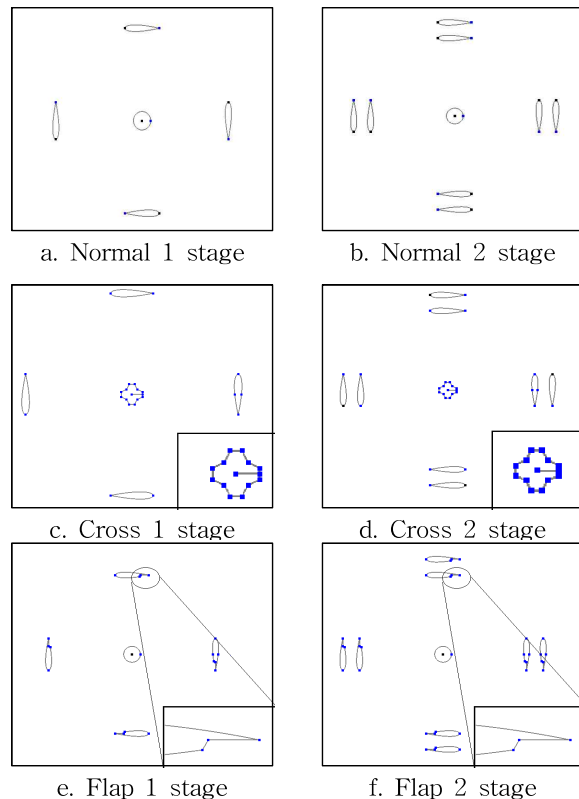


Figure 3 Various VAWT models for Mars

Table 2 Setting analysis

Solver	2D_Comp_P 3.0
Flow type	Turbulent flow
Mach number	0.082
Reynolds number	20000
Angle of Attack	0° ~ 30°
Steadiness	Steady flow
Iteration	50000
Tolerance	0.00001
CFL number	1.0
Flux scheme	RoeM
Limiter	Van Albada
Time integration	LU-SGS
Turbulence model	Menter's k- $\omega$ SST
Cell	100,000

2.3 해석 조건 설정

해석자는 유한체적법(FVM) 기반의 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes)방정식을 지배 방정식으로 사용하는 2D\_Comp\_P-3.0을 사용하였다. 화성 모래폭풍의 경우, 레이놀즈수는 낮지만 유동박리 현상이나 공력패턴이 불규칙한 특성이 존재하여 난류 유동으로 해석하였다. 자세한 난류유동 설정은 Table 2 와 같다. 화성에서의 음속은 244 m/s 이고 실험에서의 풍속은 20 m/s 이기 때문에 Mach number는  $20 / 244 = 0.082$  로 계산된다.

기존의 풍력터빈은 동적해석을 시행하였으나 EDISON의 경우 정적해석만 가능하기 때문에 받음각을 변화 시키며 해석을 진행하였다.

2.4 해석 방법

해석은 EDISON\_CFD로 도출되는 결과파일 각, Block에서의 wall의 Cl, Cd 값을 추출하여 계산하였다. 이후, 각 Case 별로 계산된 날개의 Cl, Cd 값을 가지고 단면에서의 토크 값으로 성능을 비교하였다.

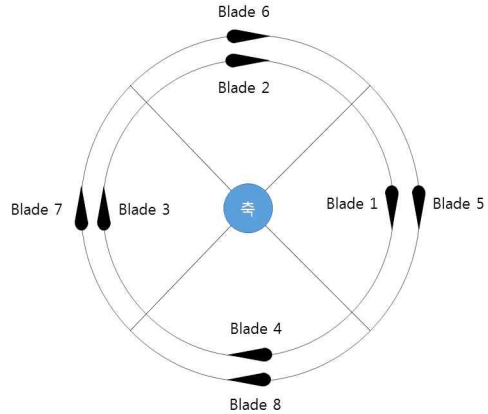


Figure 4 Numbers of blades

3.1 1 stage Airfoil의 성능 해석

Table 3에서 볼 수 있듯이, 1 stage터빈의 성능은 형상과 받음각에 따라 차이를 보였다. 0 °에서는 Normal 1 stage 에 비해 Flap 1 stage 의 성능이 향상되었으며, Cross 1 Stage 의 경우, 오히려 역(negative) 토크가 생성되어 성능감소가 발생하였다. 15 °에서는 Cross 1 stage의 성능이 다른 형상에 비해 뛰어났으며, 기존형상에 비해 0.8256 J의 토크향상이 확인되었다. 30 °의 경우, Flap 1 stage에서 역 토크가 생성되었으며, 기존의 Normal 1 stage가 7.5803 J로 가장 높은 성능을 보였다.

동일한 형상에서도 받음각의 증가에 따라, 다른 토크가 생성되었는데, Normal 1 stage의 경우, 받음각에 따라 기존 형상에 비해 각각 1.8721 J, 6.7641 J의 토크도 증가함을 볼 수 있었다. 하지만, Cross 1 stage와 Flap 1 stage에서는 받음각이 증가함에도 토크가 감소하였다.

Table 3 Torque values for 1 stage airfoil (J)

	Blade 1	Blade 2	Blade 3	Blade 4	Torque
Normal 1 stage (0°)	-0.1525	-0.1928	0.2644	0.1897	0.8162
Cross 1 stage (0°)	-0.0959	-0.2191	-0.1446	0.3151	-1.0839
Flap 1 stage (0°)	0.0667	-0.2503	0.1718	0.2695	1.9327
Normal 1 stage (15°)	-0.0105	-0.3456	0.4657	0.2488	2.6883
Cross 1 stage (15°)	0.0140	-0.3169	0.5103	0.2612	3.5139
Flap 1 stage (15°)	0.0080	-0.3676	0.4566	0.2541	2.6329
Normal 1 stage (30°)	-0.1302	-0.3102	1.0013	0.4498	7.5803
Cross 1 stage (30°)	-0.1019	-0.3166	0.7777	0.3687	5.4593
Flap 1 stage (30°)	-0.0586	-0.4960	-0.2664	0.3904	-3.2295

### 3.2 2 stage Airfoil의 성능 해석

2 stage 풍력터빈의 성능은, Table 4에서 확인 할 수 있으며, 형상과 받음각에 따라 다른 토크를 보였다. 0°에서는 Normal 2 stage 가 가장 높은 성능을 보였으며, 15°에서는 Normal 2 stage를 제외한 Cross 2 stage, Flap 2 stage에서 3.7673 J, 3.7769 J의 토크증가가 확인되었다. 30°의 경우, Flap 2 stage를 제외한 형상에서 높은 성능향상을 확인 할 수 있었다. 1 stage와 2 stage 터빈의 형상의 변화에는 특이한 성능변화는 보이지 않았다.

### 3.3 각 Case의 1단과 2단 Airfoil의 성능 비교

1 stage와 2 stage간의 성능을 살펴보면, 전체적으로 2 stage가 1 stage보다 향상된 토크 값을 보였다. Figure 7, 8, 9를 확인해 보면, 동일한 형상에서 1 stage보다 2 stage가 적게는 1.5 배에서 2 배까지 높은 성능을 보이는 것을 공통적으로 확인 할 수 있었다.

구체적으로 Normal 1 stage와 Normal 2 stage의 streamline을 비교하면, 토크증가가 큰 폭으로 이루어진 Blade 3,7의 후류의 크기가 1 stage의 Blade 3 보다 작은 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 2 stage의 내부유동이 1 stage의 내부 유동보다는 안정돼 보이는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 형상의 변화보다는 단순 익형의 2단설치가 더 높은 성능향상을 보였다(Figure 5, 6).

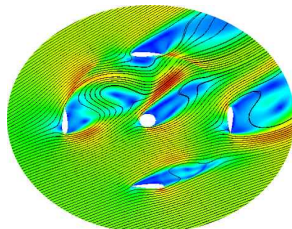


Figure 5 Streamline of Normal 1 stage

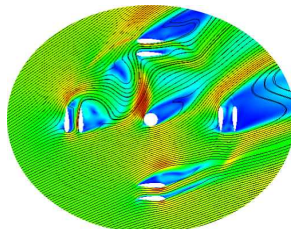


Figure 6 Streamline of Normal 2 stage

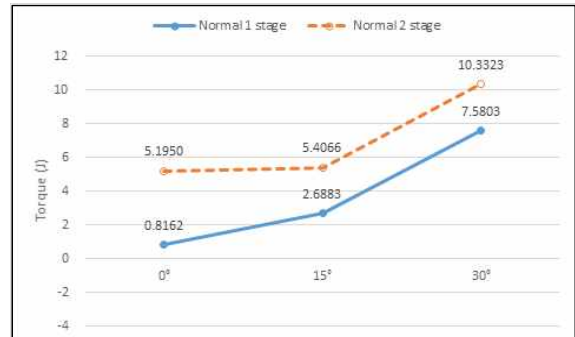


Figure 7 Torque values of Normal 1, 2 stage

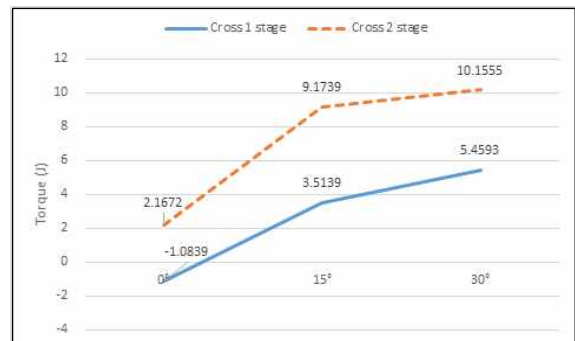


Figure 8 Torque values of Cross 1, 2 stage

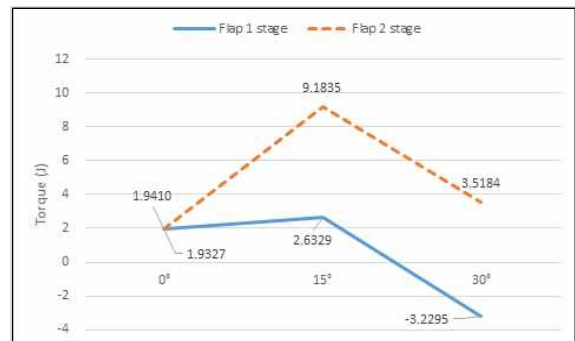


Figure 9 Torque values of Flap 1, 2 stage

Table 4 Torque values for 2 stage airfoil (J)

Blade	1	2	3	4	5	6	7	8	Torque
Normal 2 stage (0°)	0.1393	-0.2724	0.1089	0.2496	0.0590	-0.2510	0.3336	0.2477	5.1950
Cross 2 stage (0°)	-0.0539	-0.2171	-0.1243	0.2182	-0.0639	-0.1902	0.4079	0.2346	2.1672
Flap 2 stage (0°)	-0.0540	-0.2223	-0.1144	0.2206	-0.0654	-0.2061	0.3949	0.2340	1.9410
Normal 2 stage (15°)	-0.0320	-0.4254	0.2724	0.1018	0.1518	-0.2403	0.6530	0.1056	5.4066
Cross 2 stage (15°)	0.1011	-0.4131	0.0061	0.2969	0.1350	-0.2077	0.7480	0.3517	9.1739
Flap 2 stage (15°)	0.0479	-0.4681	0.1387	0.2225	0.1110	-0.2017	0.8079	0.3523	9.1835
Normal 2 stage (30°)	-0.2966	-0.4120	0.4701	0.1813	0.0706	-0.1224	0.8866	0.3609	10.3323
Cross 2 stage (30°)	-0.2543	0.2854	-0.0658	0.1290	0.0282	-0.2513	0.8563	0.4166	10.1555
Flap 2 stage (30°)	-0.3209	-0.5927	-0.3831	0.1949	0.0493	-0.1759	1.0202	0.4155	3.5184

#### 4. 결 론

Table 3, 4 에서의 결과 값을 RMS(Root Mean Square) method로 통계를 내어 Fig 10과 같이 정리를 하였다. 위에 언급한 바와 같이 2단 Airfoil은 1단 Airfoil보다 모든 Case에서 성능이 우수하였고, Flap 1, 2 stage 형상은 후류의 영향을 받아 성능이 향상 될 것이라는, 예상과 달리 가장 저조한 성능을 보였다.

가장 뛰어난 성능을 보인 모델은 Cross 2 stage 이며, 단위 미터 당 약 8 W의 성능을 낼 수 있는 것으로 확인되었다. 이는 지구에서 쓰이는 모델을 그대로 따온 Normal 1 stage 보다 1.7 배 높은 수치이다. 화성에서 10 m 높이의 발전기를 설치한다면 80 W의 전력을 생산이 가능한 것을 확인하였다.

#### 후 기

본 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2011-0020557)

#### References

- [1] Vimal Kumar, Marius Paraschivoiu, Ion Paraschivoiu, 2010, "Low Reynolds Number Vertical Axis Wind Turbine for Mas", WIND ENGINEERING.
- [2] 이영태, 임희창, 2015, "500W 급 다리우스형 풍력발전기의 최적설계를 위한 수치적 연구", 대한기계학회논문집 B권 제39권 제8호.
- [3] 서행자 외 3명, 2013, "화성 먼지 폭풍의 공간적 분포와 발생시기 분석 연구", 항공우주기술 제 12권 제2호.
- [4] 조우석 외 2명, 2013, "200 W급 자이로밀형 수직축 풍력 터빈 로터 블레이드 형상설계 및 유동해석", 한국마린엔지니어링학회지 제 36권 제2호, pp.170~177

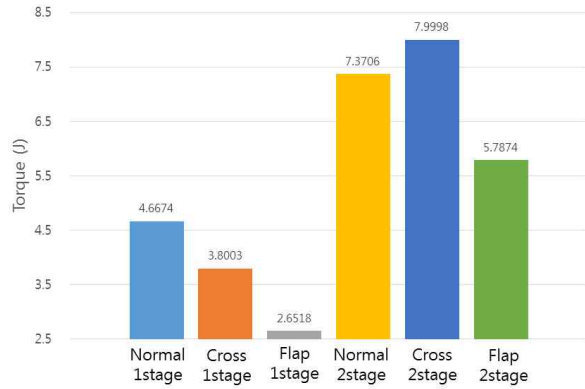


Figure 10 RMS torque values