

탄성 플랩을 갖는 2차원 날개 단면 공력 특성 전산해석

Numerical Analysis of Aerodynamics Characteristics of Two-Dimensional Blade Section with Elastic Flap

배기성^{1*}, 원창희¹, 이승수²
충북대학교 토목공학부¹

초 록

선행 연구에서 블레이드 뒷전에 탄성 플랩이 장착되면 받음각에 따라 양력의 증가가 항력의 증가보다 상대적으로 더 커지게 되어 전체적인 양항비(양력과 항력의 비)가 증가하는 것을 확인하였다. 본 논문에서는 선행의 연구를 참조하여 플랩의 길이가 변함에 따라서 양력과 항력의 변화를 비교하였다. 블레이드의 종류와 플랩의 제원은 현재 이용되는 수직축 풍력 발전기의 제품과 동일하게 사용하였다. EDISON_CFD와 MIDAS_IT를 이용하여 플랩이 장착된 블레이드 주변의 유체 유동을 해석하고, 플랩의 상하변위를 계산하였다. 이 과정을 반복 수행하여 플랩의 거동을 분석하고 플랩의 길이와 받음각에 따른 양항비를 비교하여 이전보다 효율적인 플랩을 설계하였다.

Key Words : 양항비(Lift-Drage ratio), 수직축 풍력터빈(Vertical axis wind turbine), 탄성 플랩(Elastic flap), 전산유체역학(CFD), 날개 뒷전(Trailing edge)

1. 서 론

기존의 에너지가 고갈되고 지구환경 문제에 대한 의식이 높아지면서 재생 가능한 자연에너지에 대한 관심이 높아지고 있다. 이러한 관점에서 풍력발전 시스템은 전 세계적으로 비중이 높아지고 있는 유망한 재생 가능한 에너지 시스템이다.

풍력발전 시스템은 바람에 의해 블레이드가 회전을 하면서 생기는 운동에너지를 전기에너지로 전환시키는 시스템으로써 수평축 및 수직축 풍력터빈이 있다. 수평축 풍력터빈(Horizontal axis wind turbine: HAWT)은 수직축 풍력터빈보다 에너지 효율이 높고 좁은 면적에서 활용 할 수 있다는 장점이 있지만, 바람의 방향에 따라 효율성의 차이가 크다는 단점이 있다. 반면에 수직축 풍력터빈(Vertical axis wind turbine: VAWT)은 저속풍력과 저지대 조건에서 활용 할 수 있다는 점과 바람의 방향에 상관없이 에너지를 낼 수 있다는 점이 큰 장점이다. 그러나 HAWT에 비해 에너지 효율성이 낮다는 단점이 있다.⁽¹⁾

한편, 국내에서는 저풍속의 풍황조건에 적합한 풍력 터빈에 대한 연구 개발이 활발하게 진행되고 있으며,⁽²⁾ VAWT의 낮은 에너지 효율을 보완하기 위해서 고효율 블레이드의 지속적인 개발이 중요하다. 원창희 등⁽³⁾의 연구결과를 통해 플랩이 장착된 블레이드의 효율성의 증가를 확인하였으며, 본 논문은 고효율의 플랩을 설계하는 것에 목적을 두었다.

본 연구에서는 블레이드와 플랩의 상하면에 작용하는 압력을 전산 열유체 해석 프로그램 EDISON_CFD를 이용하여 구하였으며, 구조해석 프로그램 MIDAS_IT를 이용하여 플랩의 처짐을 구하였다. 플랩의 길이와 받음각에 변화를 주어 반복 수행을 하여 플랩의 거동 및 양항비를 통한 효율성을 검토하였다.

2. 본 론

2.1 블레이드 주변의 유동 해석 조건

본 논문은 Table 1과 같은 설계 제원에 대하여 수치해석을 하였다. 블레이드는 임의의 방향에서 바람이 불어도 에너지효율이 한 방향에 치우치지 않아야 된다는 점을 고려하여 대칭형 익형인 NACA0018을 사용하였다. 받음각은 대칭형 익형을 사용하였으므로 음각은 해석하지 않고 $1^\circ \sim 6^\circ$ 로 하였다. 탄성 플랩의 경우 섬유 강화 플라스틱을 사용하였고, 적층의 두께와 배향 각도에 따라 탄성계수가 달라지는데 정확한 탄성계수를 확인 할 수 없어 해석에 있어 약간의 오차는 있을 것으로 생각된다.

선행 연구에서 전산 해석에 이용한 플랩의 길이는 0.175m 이었다. 본 연구에서는 동일한 제원에서 플랩의 길이를 0.6, 0.7, 0.8, 1.2배로 바꿔서 해석하였다. 플랩의 길이에 따라 바뀌는 레이놀즈수는 다음 식 (1)로 구해진다.

$$Re = \frac{\rho V(L+l)}{\mu} \quad (1)$$

여기서, ρ = 공기의 밀도, V = 유속, L = 날개의 길이, l = 플랩의 길이, μ = 공기의 점성계수이다. 또한, Fig. 1에서 블레이드의 회전속도(n)는 3rps이고, 블레이드 회전 반지름(R)은 1m, 중심축에서 회전 각속도(ω)는 $6\pi \text{ rad/s}$ 이다. 따라서 유속은 다음 식(2)로 구해진다.

$$V = 2\pi nR = 6\pi \text{ m/s} \quad (2)$$

Table 1 블레이드 주변의 유동 해석 조건

Blade Chord, L (m)	0.28				
Flap Length, l (m)	0.105	0.1225	0.14	0.175	0.21
Reynold's Number, Re	496810	519392	541974	587139	632304
Coefficient Of Viscosity, μ (kg/m ³ · s)	1.7894×10^{-5}				
Density, ρ (kg/m ³)	1.225				
Modulus Of Elasticity, E (N/m ²)	1.911×10^9				
Velocity, V (m/s)	6π				
Revolutions Per Second, n (rps)	3				
Angular Velocity, ω (rad/s)	6π				
Radius, R (m)	1				
Angle of Attack, AOA (deg)	$1^\circ \sim 6^\circ$				
Airfoil Type	NACA0018				

2.2 해석방법

2.2.1 EDISON_CFD와 MIDAS_IT 모델링 및 경계조건

NACA0018 익형의 격자는 2차원 격자를 사용하였으며, 익형의 앞전과 뒷전 표면 경계면에 대해 계산 결과의 신뢰도가 향상 될 수 있도록 조밀한 분포의 격자를 생성하였다. Fig. 2(a)와 같이 NACA0018 모델에 플랩을 장착하기 위해서 블레이드의 뒷전 부분이 두 점인 좌표 DAT좌표를 이용하였다. 플랩의 두께는 EDISON_CFD에서의 격자 생성을 위해 블레이드 뒷전에서 1.05mm, 끝점에서 0mm로 하였다. 블레이드와 플랩의 벽면에 경계조건은 Fig. 2(a)와 (b) 같이 점착조건(Viscous Adiabatic Wall)으로 설정하였다. O-Type 격자 생성을 위한 익형과 원을 연결하는 Branch Cut의 길이는 블레이드 해석 결과에 영향을 주지 않기 위해 15~20배로 충분히 크게 주었고, 경계조건은 주기조건(Periodic BC)으로 설정하였다. 원방 경계조건은 Far-Field BC로 설정하였다.

플랩의 길이는 0.175m의 0.6, 0.7, 0.8, 1.2배로 변화시켜 주었다. 각각의 Re와 받음각은 Table 1과 같이

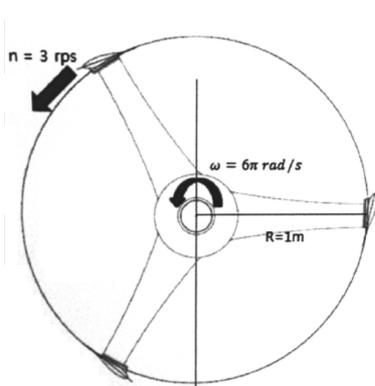
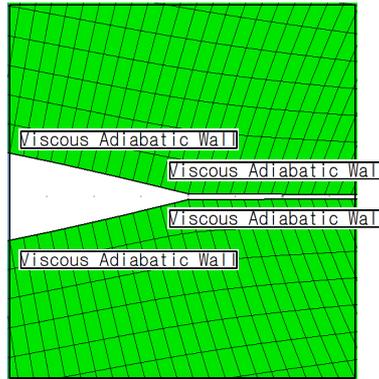
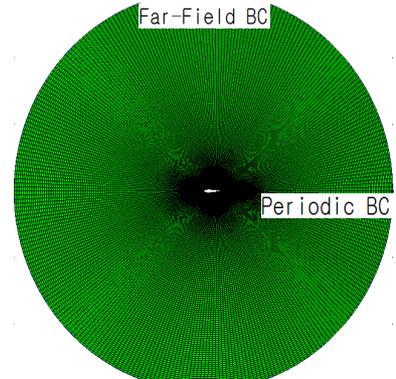


Fig. 1 수직축 풍력발전 시스템



(a) 상세 격자



(b) 전체 격자

Fig. 2 플랩이 장착된 블레이드 격자 및 경계조건

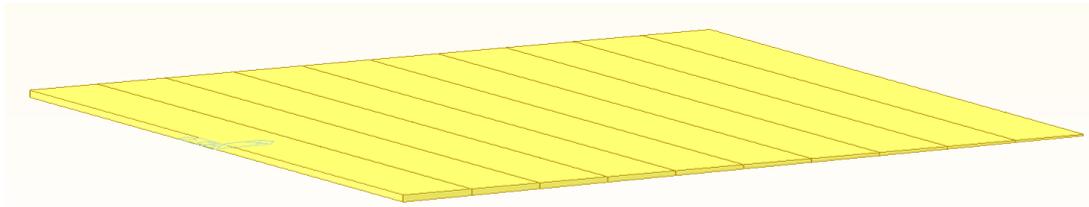


Fig. 3 MIDAS_IT 플랩 모델

설정하였고, Iteration을 50000, error tolerance을 0.00001로 설정하였다. 전체 유동장은 난류로 가정하고, 2차원 비압축성 정상 유동으로 설정하였다.

또한, MIDAS_IT의 플랩의 탄성계수는 $1.911 \times 10^9 N/m^2$ 설정하였고, 탄성플랩은 Fig. 3과 같이 단위 폭 0.1m로 모델링하였다.

2.2 EDISON_CFD, MIDAS_IT 해석

플랩은 받음각과 형상에 따라 상면과 하면의 압력차로 인한 처짐이 발생한다. 처짐이 발생하면 플랩의 상하면에 작용하는 압력차는 변하게 되고, 플랩은 다시 변위차가 발생한다. 이 과정을 반복하여 플랩의 거동을 알아보기 위해 Fig. 4과 같은 알고리즘을 수행하였다. 먼저 EDISON_CFD을 이용해 플랩의 길이와 받음각에 따른 C_p 값을 통해 임의의 플랩 위치에서 압력(P) 값을 구할 수 있으며, P 값은 다음 식(3)

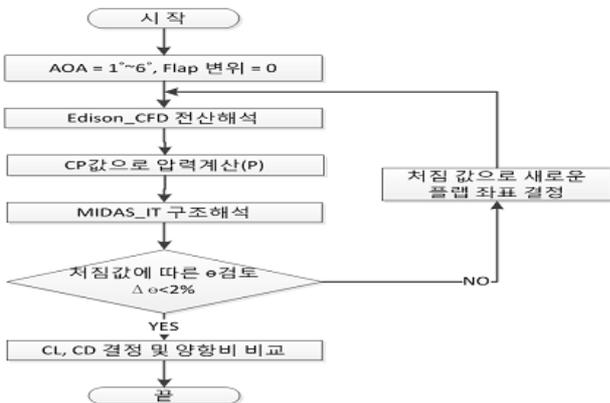


Fig. 4 해석 순서도

으로 구해진다.

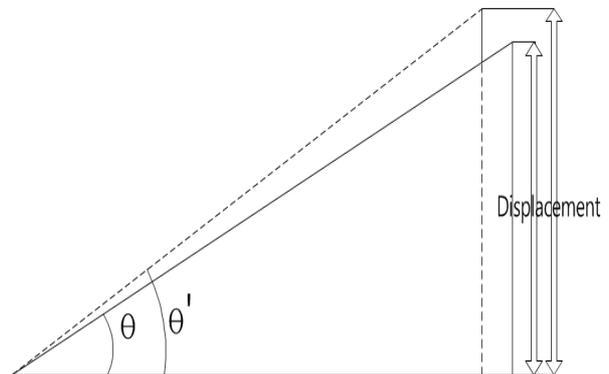


Fig. 5 플랩의 수렴조건

$$C_P = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2}\rho V^2}, \quad \therefore \Delta P = \frac{1}{2}\rho V^2 C_P. \quad (3)$$

따라서, 플랩의 상하면에 작용하는 압력을 알 수 있으며, 압력 값을 MIDAS_IT 구조 해석을 통해 플랩의 처짐 값을 구할 수 있다. 처짐 값과 전 단계 플랩의 위치 값을 적용시킴으로써 새로운 플랩의 위치를 구할 수 있다. Fig. 5와 같이 $\Delta\theta$ 가 2% 이내 일 경우 최종 C_L , C_D 값을 출력하고, 2%를 초과하면 변위를 고려하여 새로운 격자를 생성하고 해석하는 과정을 반복하였다.

2.3 해석결과

원창희 등⁽¹⁾의 연구결과에서 EDISON_CFD와 범용 전산 해석 프로그램 Fluent의 비교를 통해 EDISON_CFD의 결과에 대한 타당성을 검증하였다. Fig. 6는 플랩이 장착되지 않은 블레이드의 받음각에 따른 양항비 결과를 EDISON_CFD와 Fluent로 해석 결과이다. 해석 검증 결과 EDISON_CFD는 신뢰할만한 해석 결과를 산출하였고, 이와 동일한 방법으로 플랩이 장착된 NACA0018의 해석을 수행하였다.

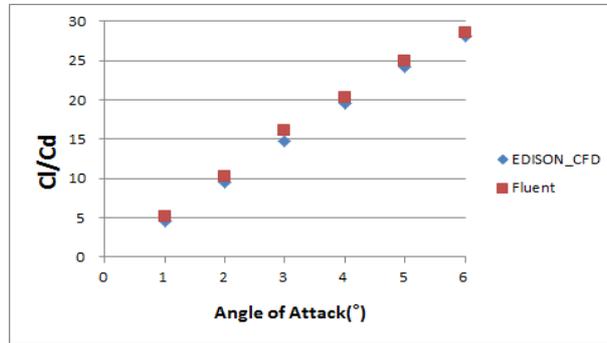


Fig. 6 EDISON_CFD와 Fluent의 양항비

본 논문에서는 탄성 플랩의 길이와 받음각에 따른 공력 특성을 비교 분석하였다. 탄성 플랩의 길이에 따른 플랩의 거동은 Fig. 7와 같이 3가지 경향이 나타났다. Fig. 7 (a)와 (b)는 플랩이 일정 위치에서 수렴하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 7 (a)는 플랩의 길이가 0.175m 일 경우, Fig. 7 (b)는 플랩의 길이가 0.175m보다 작은 경우를 나타낸다. 두 경우 모두 반복회수에 따라서 양항비가 증가와 감소를 반복한다. 이는 곧 양력과 항력의 변화를 뜻하며, 반복회수에 따라 양항비의 변화량은 감소하기 때문에 플랩이 상하진동을 하다가 일정한 값에 수렴하게 된다. Fig. 7 (b)의 그래프에서 초기 반복회수 10회까지 플랩의 위치가 증가하는 이유는 플랩의 길이가 0.175m보다 줄어들면 플랩이 위로 처지는 값이 상대적으로 작아

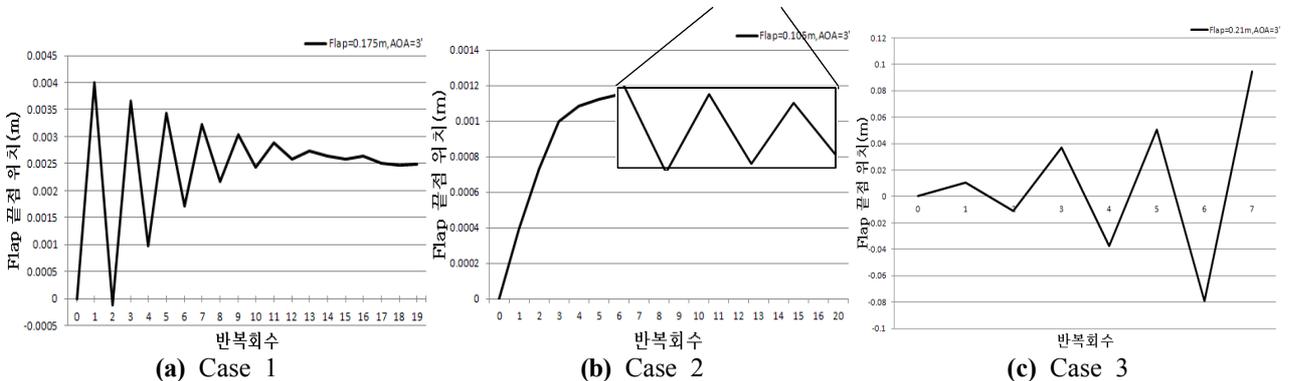


Fig. 7 반복회수에 따른 플랩의 거동

지기 때문에 상하진동을 시작하는 위치까지 플랩이 상승하는 것으로 판단되며, 상하진동의 폭은 매우 작은 것을 볼 수 있다. 반면에 Fig. 7 (c)는 플랩의 길이가 늘어났을 때의 경우를 나타내며, 플랩의 끝점이 일정 위치에 수렴하지 않고 변화량이 발산하는 것을 확인 할 수 있다. 플랩의 길이가 반복회수에 따른 C_L 와 C_D 에 큰 영향을 주는 것으로 판단된다. 따라서 플랩의 길이를 0.175m보다 증가시키는 것은 매우 불안정한 상태를 발생시키고, 플랩 파괴의 원인이 될 수 있다고 판단된다.

한편 Fig. 8에서 받음각이 커질수록 그래프의 기울기가 작아지는 것을 볼 수 있으며, 5° 부터는 받음각이 증가함에 따라 C_L 의 증가가 C_D 의 증가보다 상대적으로 작아지는 것을 알 수 있다. 또한, 플랩의 길이가 줄어들면 양항비가 전체적으로 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 플랩의 길이가 0.175m보다 줄어들면 C_L 의 감소보다 C_D 의 감소가 크다는 것을 확인 할 수 있다. Table 2는 0.175m 길이의 플랩에 대한 양항비 증가율을 나타낸다. 플랩의 길이가 줄어들었을 때 30~50% 양항비가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. 이는 곧 플랩의 길이가 0.175m보다 작을 때 더 효율적이라고 판단되며, Table 3에서 각 플랩의 길이와 받음각에 따른 양항비를 비교 할 수 있다. 플랩의 길이가 0.14m일 때 1°를 제외하고 각각의 받음각에서 가장 큰 양항비를 나타냈다. 그러나 플랩의 길이가 0.14m보다 줄어들면 양항비 값은 대체로 줄어드는 것을 확인 할 수 있다.

또한, Fig. 8와 Table 3에서 플랩의 길이가 0.175m일 때, 받음각 5°와 6°에서는 플랩이 장착되지 않은 블레이드 보다 비효율적인 것을 확인 할 수 있지만, 플랩의 길이가 0.175m보다 줄어들면 양력의 증가율이 항력의 증가율보다 상대적으로 더 커지게 되어 더 효율적인 것을 확인 할 수 있다.

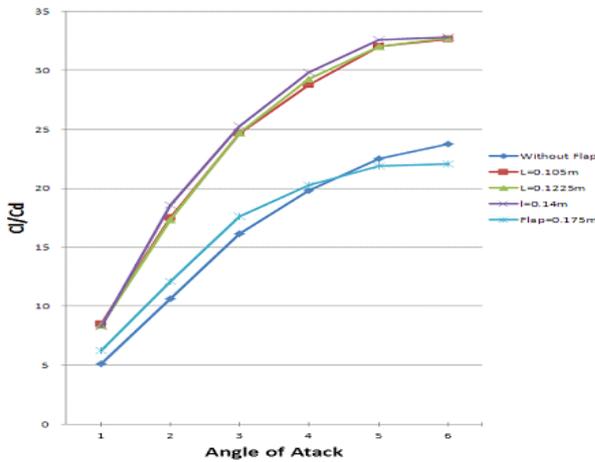


Fig. 8 플랩 길이에 따른 양항비 비교

Table 2 Flap=0.175m에 대한 양항비 증가율

AOA	Rate of increase(%)		
	Flap=0.105m	Flap=0.1225m	Flap=0.14m
1°	36.212	34.344	32.660
2°	44.663	43.483	53.460
3°	39.733	40.139	43.472
4°	42.178	44.545	47.351
5°	46.369	46.253	48.823
6°	47.852	48.414	48.509

Table 3 플랩 길이에 따른 양항비 비교

AOA	Without Flap	Flap=0.105m	Flap=0.1225m	Flap=0.14m	Flap=0.175m
1°	5.153	8.528	8.411	8.305	6.261
2°	10.620	17.494	17.351	18.558	12.093
3°	16.157	24.644	24.716	25.304	17.637
4°	19.804	28.787	29.267	29.835	20.247
5°	22.498	32.056	32.031	32.593	21.901
6°	23.756	32.657	32.782	32.803	22.088

3. 결론

풍력 터빈 시스템에서 블레이드의 양력을 높이고 항력을 감소시키는 것은 매우 중요한 문제이다. 본

논문에서는 블레이드 뒷전에 장착된 탄성 플랩의 길이와 받음각에 따른 블레이드의 공력 특성을 알아보았다. 얇은 탄성 플랩의 장착으로 블레이드의 전체적인 특성 길이가 길어지게 되어 양력이 증가하지만, 양력의 증가에 비해 항력이 더 크게 증가한다면 이는 곧 블레이드의 전체적인 효율이 감소하게 된다. 탄성 플랩을 장착하는 것이 블레이드의 효율을 높일 수 있는 방법이지만 플랩의 길이가 0.14m보다 짧아지면 효율성이 떨어지고, 0.175m보다 커지면 블레이드의 양항비는 일정 값을 유지하지 못하고 불안정한 상태가 됨으로 플랩으로써 적절하지 못하다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한, 플랩의 길이가 0.175m일 때 받음각 3° 이내에서만 효율성을 얻을 수 있었지만 플랩의 길이를 0.175m보다 줄인다면 받음각 5°, 6°에서 고효율을 낼 수 있다고 판단된다.

따라서 플랩의 길이를 0.14m로 줄이고 받음각 5° 또는 6°에서 수직축 풍력 블레이드를 회전 시킬 수 있다면, 기존 수직축 풍력발전 시스템보다 더 효율적이라고 판단된다. 또한, 향후 구조-유체 연성해석에 대한 지속적인 연구가 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부 첨단 사이언스 교육 허브 개발 사업(과제 No. 2011-0020564) 지원으로 수행되었습니다.

참고 문헌

- (1) Shin, J. Y., Son, Y. S., Cha, D. G., Lee, C. G. and Hwang, I. C., 2006, "Aerodynamic Characteristic of A Vertical Axis Wind Turbine Blade," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 30, No. 8, pp. 877~884.
- (2) Cho, W. Y., Kim, H. S. and Choi, Y. D., 2013, "Shape Design and Flow Analysis on A 200W-class Gyromill Type Vertical Axis Wind Turbin Rotor Blade," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 170~177.
- (3) Won, C. H., Lee, J. Y. and Lee, S. S., 2013, "Numerical Analysis of Aerodynamics Characteristics of Two Dimensional Airfoil Section with Elastic Flap," 대한기계학회 2013년도 학술대회 강연 및 논문 초록집, pp 219
- (4) Je, D. H., Hwang, E. S. and Lee, J. H., 2013, "A Study for Laminar and Turbulent Boundary Layer Theory Around A Joukowski and NACA-0012 Airfoil by CFD," *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 14, No. 4, pp. 1533~1539.
- (5) Hong, C. H., Seo, S. Ho., 2011, "Numerical Analysis on Performance Improvement for Wind Blade by The Groove," *Journal of the Korean Society of Marine Engineering*, Vol. 35, No. 4, pp. 475~482.