

블레이드 공력 설계를 위한 설계 변수 특성에 대한 연구

신 형기¹⁾, 방 형준²⁾, 김 석우³⁾

Parameteric study for wind turbine blade design

Hyungki Shin, Seokwoo Kim, Hyungjoon Bang

Key words : wind turbine(풍력발전기), blade(블레이드), design variable(설계 변수), parameteric study

Abstract : 풍력 발전기의 블레이드 설계를 위하여 각 설계 변수에 대한 영향을 파악하기 위하여 연구를 수행하였다. 블레이드의 공력 형상을 결정짓는 설계 변수를 분류하고 이에 대하여 parametric study를 통하여 각 설계 변수가 주어진 환경에서 블레이드의 성능 및 하중에 어떠한 영향을 주는가에 대하여 살펴보았다. 이를 블레이드의 성능 및 기준 하중에 대한 해석은 BEMT를 이용하였다. 본 결과는 블레이드의 실제 공력 설계에서 설계 변수의 선정과 그 영향에 대하여 미리 파악하는데 도움을 줄 것으로 기대된다.

1. 서론

풍력 블레이드의 공력 설계는 기본적으로 풍력 발전기 전체의 성능을 좌우하는 중요한 요소이다. 그러나 국내의 경우 블레이드 공력 설계를 대부분 해외에 의뢰하거나 혹은 정리되지 않은 방법을 통하여 설계가 이루어졌다. 본 논문에서는 블레이드의 체계적인 설계를 위하여 블레이드의 각 설계 변수가 실제로 성능에 어떤 영향을 미치는지에 대하여 논하고자 한다.

$$AEP(kWh/yr) = 8.76 \int_{U_{cutin}}^{U_{cutout}} P(U)f(U)dU$$

AEP의 경우 블레이드 설계 관점에서 볼 때 최대 Cp값을 높이고 블레이드 길이는 늘림으로서 AEP를 크게 할 수 있다. 그러나 이는 블레이드 하중과 무게를 증가시키며 이에 따라 블레이드의 단가와 시스템 전체 단가를 늘리게 된다. Cost의 경우 블레이드 길이, 무게 이외에도 블레이드에 가해지는 하중이 중요한 변수이다. 그러나 현 단계에서 모든 케이스에 대하여 정확한 하중 계산은 불가능 하기 때문에 기준 하중으로 정상 운전 상태에서 블레이드 루트에 가해지는 bending moment와 axial force를 기준 하중으로 삼고자 한다. 이를 통하여 이는 실제적으로 블레이드 하중의 감소에 대한 Cp, AEP의 감소 비율을 통하여 trade-off에 대한 판단 기준으로 삼는다.

2. 블레이드 공력 형상 설계 변수 분석

2.1 블레이드 공력 설계 목표

블레이드 설계에 있어서 최종 설계 목표는 C.O.E(Cost Of Energy)를 최소화하는 것에 있다. 실제로 C.O.E는 시스템의 성능과 단가 이외에도 가동율, 유지 보수 비용, 시장 상황, 금융 상황 등에 복잡하게 얽혀있다. 따라서 블레이드의 개념 설계 단계에서부터 정확한 C.O.E 모델을 적용하는 것은 현실적으로 불가능하다. 이런 이유로 본 연구에서는 다음과 같이 C.O.E를 단순화 시켜서 설계에 적용하고자 한다.

$$COE = \frac{Cost_{blade}}{AEP_{aero}}$$

여기서 분모에 해당하는 AEP의 경우 다음식과 같이 정의된다. 이 경우 시스템의 가동율이 100%라고 가정하며 바람의 방향 변화, 거스트 난류 등이 없는 이상적인 Weibull 분포를 갖는다고 가정한다. 본 연구 단계에서 계산된 모든 AEP값은 다음 식을 따르게 된다.

블레이드 공력 형상 설계에서 결정해야하는 기본 변수는 TSR, 블레이드 길이, 두께분포, 에어포일, 코드와 트위스트 분포이다. 본 논문에서는 각각의 값에 대해 블레이드의 성능과 기준 하중에 어떠한 영향을 미치는지에 대하여 알아보고자 한다.

블레이드의 성능과 하중 해석은 3차원 실속 모델과 후류 모델, 팁과 루트에서의 손실을 고려한 BEMT를 통하여 이루어졌으며, 코드와 트위스트 분포는 구배법에 의해 최대 Cp를 찾는 설계 방법을 통하여 이루어졌다.

2.2 풍속 분포의 영향

설계 환경의 결정을 위하여 풍속 분포가 블레이드의 코드와 트위스트 분포에 주는 영향에 대하여 미리 살펴보았다. 풍속 분포는 Weibull 분

포로 모델링 되었으며 Weibull shape parameter(k)와 scale parameter(a)의 변화에 의해 36가지 풍속 분포에 대하여 각각 코드와 트위스트 분포에 대한 설계를 수행하였다. 설계에 사용된 Weibull 분포의 형상은 다음 그림 1과 같으며 이때 각각의 평균 풍속은 표 1과 같다.

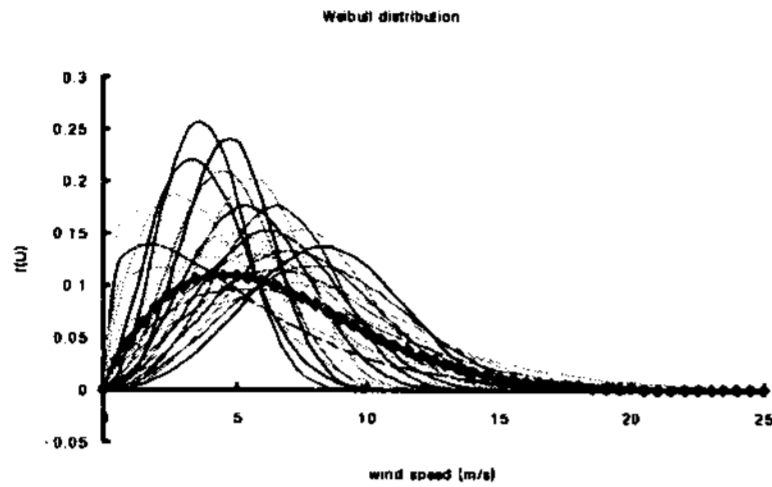


그림 1. Weibull distribution

a \ k	1.3	1.8	2.3	2.8	3.3	3.8
4.3	3.97	3.82	3.81	3.83	3.86	3.89
5.3	4.90	4.71	4.70	4.72	4.75	4.79
6.3	5.82	5.60	5.58	5.61	5.65	5.69
7.3	6.74	6.49	6.47	6.50	6.55	6.60
8.3	7.67	7.38	7.35	7.39	7.45	7.5
9.3	8.59	8.27	8.24	8.28	8.34	8.41

표 1. a, k 값에 따른 평균 풍속

그림 3은 36가지 케이스에 대해 각각 설계된 블레이드의 코드와 트위스트 분포를 보여 주며 표 3, 4는 이때의 Cp 최대 값과 AEP 값을 보여준다. 각각 경우의 정해진 블레이드 길이에서 코드와 트위스트 분포가 AEP를 최대가 되도록 설계된 형상이다.

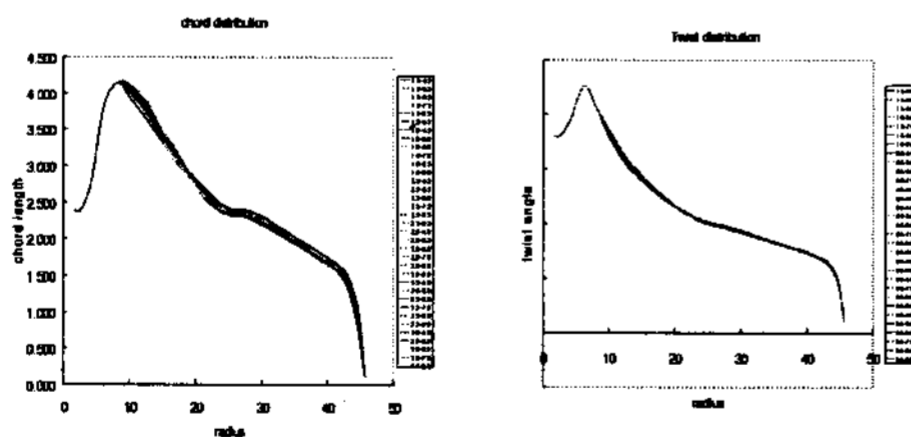


그림 2. 코드 & 트위스트 분포

그림 2를 살펴보면 각각의 경우에서 코드 길이와 트위스트 값의 변화가 어느 정도 있는 것처럼 보인다. 그러나 실제로 이러한 형상 변화에 대한 유의성을 알아보기 위하여 코드 길이의 최대/최소 값과 트위스트각의 최대/최소 값에 대하여 a=7.4, k=2.3에 대하여 Cp와 AEP를 계산하여 보았다. 각 경우에 대한 Cp와 AEP 값은 그림 3에서 보여진다. 그림 3에서 알 수 있듯이 각 경우에 대한 Cp와 AEP의 차이는 1%에 못 미치는 거의 영향이 없는 것을 보여준다. 이는 풍속 분포에 대하여 설계된 코드 분포와 트위스트 분포의 변화는 실

제 성능에 영향을 주지 않을 정도의 작은 차이임을 보여 준다. 이러한 결과는 가변속/피치 제어 방식의 운전 특성에 기인한다. 가변속 운전의 경우 정격 풍속 이하에서는 최대 Cp가 나오는 TSR이 유지되도록 운전되며 정격 풍속 근처에서부터 피치각을 변화시켜 정격이 유지되도록 운전된다. 따라서 가변속/피치 제어 방식의 경우 풍황에 대해 블레이드 길이를 제외한 다른 형상 변수에 대한 설계는 큰 의미가 없다고 판단 된다.

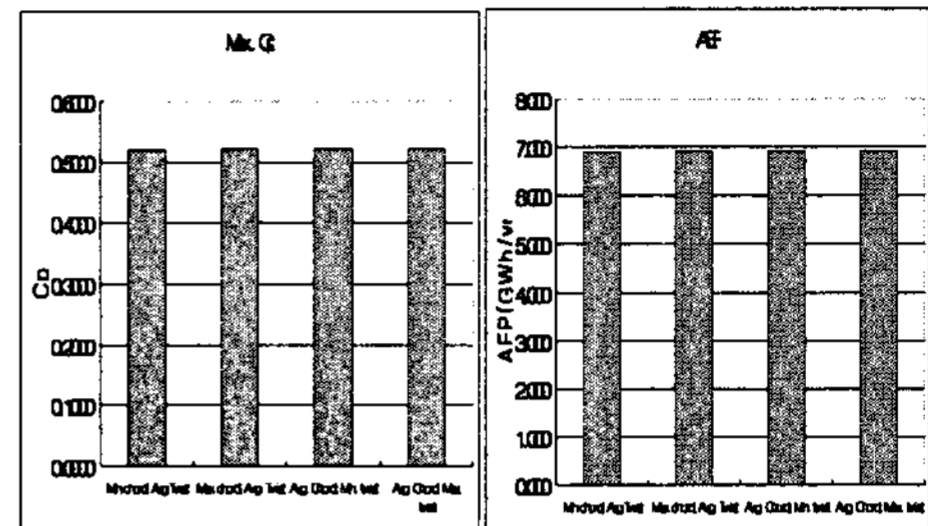


그림 3 풍황에 대한 Cp, AEP 값 비교

2.3 루트부 설계의 유효성 검토

블레이드의 길이 방향에 대하여 r/R이 20% 이하되는 부분의 전체 블레이드 성능에 미치는 영향에 대하여 살펴보았다. r/R < 20% 부분은 로터 회전면에 대하여 4%의 면적을 차지하고 있다. 따라서 루트 부분이 에너지를 전혀 흡수하지 못한다고 가정한 경우에 대하여 이상적으로 볼 때 루트부의 설계 여부에 따라서 4%의 효율 상승을 기대할 수 있다. 그러나 실제 블레이드의 경우 루트부 안쪽도 어느 정도의 에너지를 흡수할 수 있으며, 또한 실제로 루트부로 가게 되면 효율이 급감하여 이상적인 효율을 얻을 수 없게 된다. 이에 대한 영향을 실제로 살펴보고자 기준이 되는 실제 블레이드 형상 모델에 대하여 20%안쪽의 루트부가 실린더 형상으로만 구성되어 실제로 에너지를 전혀 흡수 못하는 경우와 허브와의 연결부분까지 에어포일이 배치되는 이상적인 경우에 대하여 Cp와 AEP를 비교하여 보았다. 그림 4는 각 경우에 대하여 설계된 코드 분포와 트위스트 분포를 보여준다. 허브 연결부까지 에어포일을 배치한 경우는 루트부에서 코드 길이가 상당히 증가하며 트위스트의 경우 유동각을 맞추기 위하여 연결부위까지 계속해서 증가함을 볼 수 있다. 이에 대한 Cp와 AEP 변화는 그림 5에서 볼 수 있다. 루트부가 모두 실린더로 구성된 경우와 반대로 에어포일로 구성된 경우를 비교하여 보면 4% 이상의 성능 향상이 있음을 알 수 있다. 그러나 기준이 되는 실제 블레이드의 경우와 비교해 볼 때는 1% 이하의 성능 향상을 보이고 있다. 이는 실제 블레이드의 경우 루트부도 어느 정도 에너지를 흡수하고 있으며, 또한 이 정도의 차이는 해석 코드의 오차 범위 안이므로 실제 설계에서 유의한 데이터로 사용하기 어렵다. 따라서 루트부의 형상 설계는 구조 강도와 허브와의 결합 문제를 우선적으로 고려하여 설계하는 것이 적절하다. 이런 이유로 블레이드 루트부에 대한 설계는 개

넘 설계 단계에서는 그 차이를 얻어내기 힘들며, BEMT 자체의 한계성이 있기 때문에 실제로 CFD 해석을 통하여 그 영향을 자세히 분석하는 것이 필요하다.

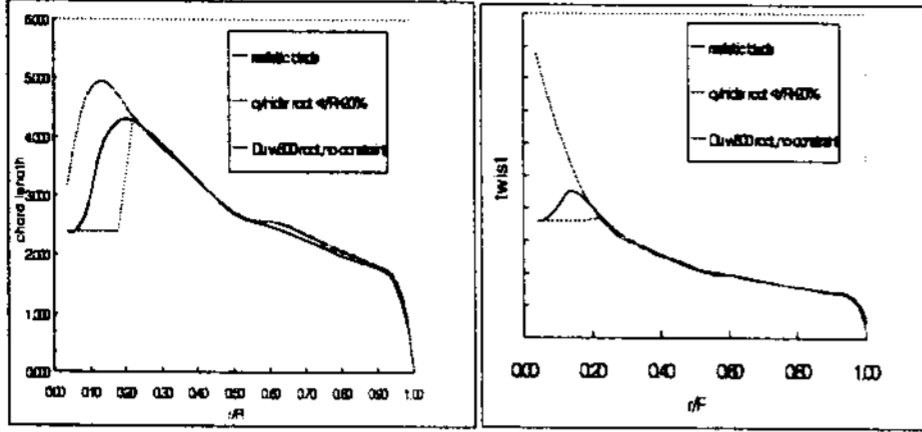


그림 4. 루트부에 따른 코드 & 트위스트 분포

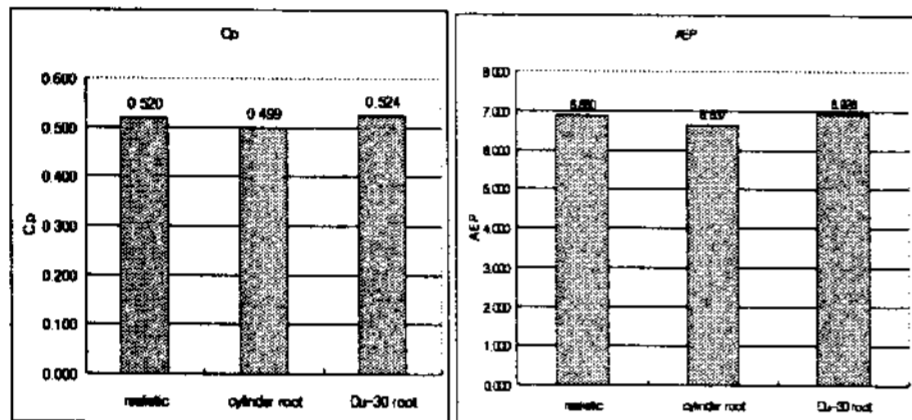


그림 5 루트부에 따른 Cp, AEP 값 비교

2.4 블레이드 길이의 영향

블레이드 설계에 있어서 가장 중요한 변수 중에 하나는 블레이드 길이이다. 로터가 받는 바람의 에너지는 면적에 비례하기 때문에 블레이드 길이에 제곱 비례하여 연간 에너지 생산량이 결정된다. 따라서 블레이드 길이가 길어질 수록 AEP는 증가하게 된다. 그러나 블레이드 길이가 길어지면 무게가 증가하고 블레이드가 받는 하중 역시 증가하기 때문에 블레이드 및 시스템 전체 코스트의 증가를 가져오게 된다. 따라서 개발하고자 하는 시스템의 용량과 목표하는 시스템 단가, 사이트의 IEC wind class에 적절한 블레이드 길이를 결정하는 것이 중요하다. 연구에서는 기본이 되는 블레이드 길이를 44m로 설정하여 이에 대하여 +/- 5%, 10%의 길이 변화를 주어 각각의 경우에 대해 코드 길이와 트위스트를 최적화하여 Cp, AEP와 참고 하중을 계산하였다. 그림 7은 각각의 경우에 대하여 코드 길이와 트위스트 분포를 보여준다. 블레이드 길이를 조절하는 경우 이에 비례하여 단순히 코드 길이와 트위스트를 조절하는 것이 아닌 각각의 경우에 최적화하는 것이 어느정도 필요함을 알 수 있다. 표 2는 각각의 경우에 대한 Cp, AEP와 축방향 하중, 블레이드 루트에서의 모멘트를 보여주고 있다. 어느 경우나 최적화에 의해서 같은 Cp를 가지고 있으며 AEP와 참고 하중은 모두 길이에 제곱 비례하고 있음을 알 수 있다. 블레이드 길이에 대한 수정은 실제로 설계의 자세한 하중 해석과 이에 따른 블레이드 무게의 증가, 시스템 단가의 증가를 통하여 수행하여야 하며 본 개념 서레 단계에서는 참고 하중에 대하여 AEP 증가율과 하중 증가율을 참고하게 된다.

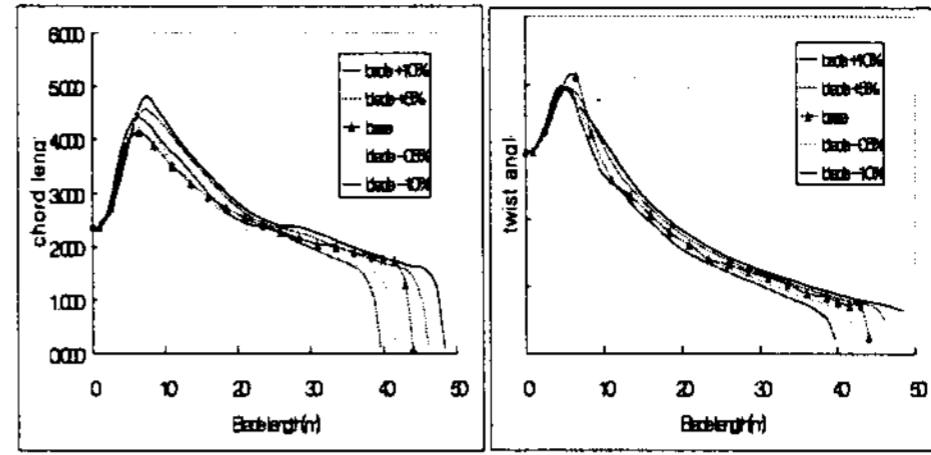


그림 6 블레이드 길이에 따른 코드 & 트위스트 분포

	$C_{p,max}$	$F_{ax,max}$	$M_{bl,max}$	AEP
+10% bl length	0.52	453	4735	7.96
+5% bl length	0.52	455	4519	7.42
Base bl length	0.52	427	4031	6.92
-5% bl length	0.52	397	3538	6.34
-10% bl length	0.52	373	3097	5.76

표 2. 블레이드 길이 변화에 따른 성능과 참고 하중

2.5 두께 분포의 결정

블레이드 설계에서 다음 단계는 길이 방향에 대한 두께 분포의 결정이다. 두께 분포는 실제로 에어포일의 위치에 영향을 주기 때문에 블레이드 전체 성능에 영향을 주게 된다. 실제로 블레이드 성능을 높이기 위해서는 가능한 얇은 두께를 팁에서 루트까지 유지하는 것이 필요하다. 그러나 이는 내부 구조 설계에 영향을 주게 되어 실제로 구현에 어려움이 따른다. 또한 두께 분포는 블레이드의 길이 방향에 대한 무게 분포에도 영향을 주기 때문에 블레이드의 관성력에 역시 영향을 주게 된다. 두께 분포의 변화율의 경우 블레이드 표면 몰드 제작과 내부 스파 배치 등의 용이성에 영향을 주게 된다. 본 설계 단계에서는 이러한 두께 변화가 블레이드의 성능과 참고 하중에 어떠한 변화를 주는지 알아보기 위하여 두께 분포를 변화시키며 Cp, AEP를 성능 계수로 하고 축방향 하중 F_{ax} , 블레이드 루트에서의 모멘트 M_{bl} 을 참고 하중으로 하여 계산을 수행하였다.

블레이드의 두께비는 루트에서 40%, 팁에서 18%로 고정된 상태에서 18%의 두께비가 유지되는 위치와 18%의 두께비가 40%의 두께비로 변화되는 비율을 선형과 2차 곡선 형태로 각각 모델링하여 블레이드의 두께 분포를 만들어 내었다. 이에 더해 35%의 두께비가 전체적으로 유지되는 경우와 18%의 두께비가 22%의 위치에서 팁 부분까지 유지되는 극단적인 경우를 비교하여 보았다. 그림 7은 두께 변화의 모습을 보여주며 표 3, 4는 이에 따른 성능과 하중 변화를 보여준다. 예상한 바와 같이 18%의 두께를 가능한 루트부쪽으로 유지시키는 블레이드가 성능상의 유리함을 보여주고 있다. 직선으로 모델링한 경우 18% 두께가 유지되는 위치에 대하여 선형적으로 성능이 감소하는 모습을 볼 수 있지만 2차 곡선으로 모델링한 경우 팁에서 루트까지의 두께 변화가 완만하다가

급격해지기 때문에 실제 성능변화가 상대적으로 크지 않다. 2차 곡선으로 모델링한 경우 77%의 위치까지 18%의 두께를 유지하는 경우 22%까지 18%의 두께를 유지한 경우에 비해서 그 성능의 차이가 0.5%이하를 보여주고 있다. 이에 비해서 선형으로 모델링한 경우는 18%의 두께를 55% 위치까지 유지해야만 2차 곡선으로 모델링한 경우의 77%위치와 동일한 성능을 보여준다. 성능의 변화와 참고 하중의 변화를 보면 선형의 경우 성능의 저감 비율과 하중의 저감 비율이 동일하다. 그러나 이에 비해 2차 곡선으로 모델링한 경우 성능의 저감이 1% 발생할 때 하중의 저감은 2% 정도 발생한다. 따라서 두께 변화를 선형으로 모델링한 경우 제작상의 유리함을 가질 것으로 예상하나 성능과 하중 측면에서 볼 때 2차 곡선형태로 두께 변화를 설정하는 것이 타당할 것으로 보인다.

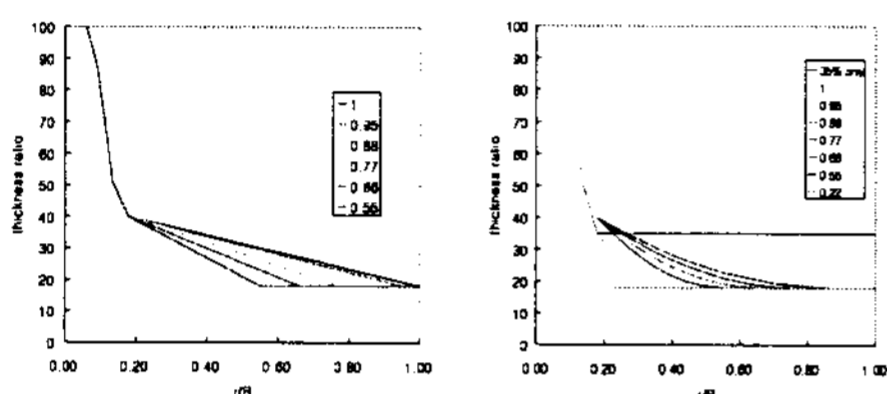


그림 7 두께 분포-선형 변화 & 2차 함수 변화

18% Section	$C_{p_{max}}$	$F_{ax_{max}}$	$M_{bl_{max}}$	AEP	18% Section	$C_{p_{max}}$	$F_{ax_{max}}$	$M_{bl_{max}}$	AEP
r/R=1	0.509	421	4051	6.75	r/R=1	0.517	424	4071	6.84
r/R=0.95	0.511	426	3942	6.78	r/R=0.95	0.519	429	4122	6.86
r/R=0.88	0.514	425	4012	6.81	r/R=0.88	0.517	425	4016	6.86
r/R=0.77	0.517	421	3952	6.83	r/R=0.77	0.519	421	4010	6.87
r/R=0.66	0.518	424	3927	6.85	r/R=0.66	0.521	426	4021	6.88
r/R=0.55	0.520	423	3972	6.87	r/R=0.55	0.524	424	3973	6.89
Min/Max	97.9%	97.7%	98.1%	99.2%	Min/Max	99.7%	98.5%	97.5%	98.0%

표 3. 두께 분포에 따른 성능 변화(선형 & 2차함수)

2.6 에어포일의 선택

에어포일의 선택은 블레이드 설계에서 가장 중요한 단계중 하나이다. 에어포일의 선택에 있어서 가장 중요한 제한 요인은 두께비 분포이다. 에어포일의 경우 일반적으로 두께비가 낮을 수록 높은 양항비를 가지게 된다. 이는 표 3에서 18%의 두께비를 22%에 위치시킨 경우의 성능값을 보면 확인할 수 있다. 그러나 구조적인 문제로 블레이드 전체를 이 두께비로 만들 수 없다. 따라서 높은 양항비를 가지는 에어포일의 선택은 블레이드의 효율을 높이기 위하여 필수적이다. 또한 풍력 블레이드의 경우 외부에 계속적으로 노출되기 때문에 블레이드 표면이 쉽게 오염된다. 따라서 에어포일의 선택에서 중요한 기준 가운데 하나가 표면 거칠기에 대한 민감도 정도이다.

본 단계에서는 두가지 세트의 에어포일에 대하여 블레이드를 설계하고 이에 대한 해석을 수행하였다. 표 4는 선택된 에어포일을 보여준다. 두께비가 25% 이상인 에어포일의 경우 항공기용 에어포일에서는 드물기 때문에 대체적으로 DU 에어포일과 같이 풍력 블레이드 전용으로 설계된 에어포일이 대부분이다. 두께비 25% 이하의 경우

다양한 에어포일이 존재하지만 앞서 이야기한 선택 기준과 앞절에서 2차 함수로 결정된 두께비에 맞추어서 표 4에서와 같은 에어포일을 이용하여 블레이드를 설계하였다. 그림 8은 각각의 경우 설계된 블레이드의 코드 분포와 트위스트 분포를 보여준다. 그림에서 볼 수 있듯이 선택된 에어포일에 따라서 코드 길이 분포와 트위스트 분포에 상당한 영향을 줄 수 있다. 또한 바깥쪽 부분의 에어포일만 변경하는 경우라도 그 영향이 루트부에 까지 미침을 알 수 있다. 표 5는 각각의 경우 성능과 참고 하중을 보여주고 있다. 표에서 알 수 있듯이 적절한 에어포일의 선택은 전체 성능과 하중에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있다. Set#2의 경우 Set#1에 비해서 하중은 3%이하로 증가하지만 성능은 3~4% 증가함을 알 수 있다. 실제로 에어포일이 정해지게 되면 블레이드 전체의 한계 효율이 정해지게 된다. 따라서 블레이드의 효율을 증가시키기 위해서는 적절한 에어포일의 선택이 중요하며 이에 대한 정확한 형상 데이터와 성능 데이터의 확보가 필수적이다.

Airfoil set #1	Airfoil set #2
Cylinder	Cylinder
DU 00-W-401	DU 00-W-401
DU 97-W-300	DU 97-W-300
DU 91W2-250	DU 91W2-250
FFA-W3-211	DU-93W-210
DU 96-W-18	NACA 64-18

표 4. 에어포일 세트

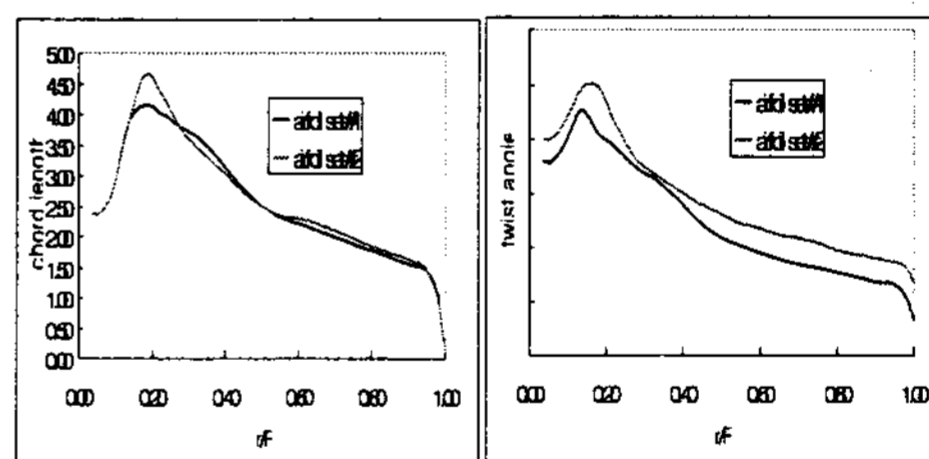


그림 8 에어포일에 따른 코드 & 트위스트 분포

	Set#1	Set#2	
$C_{p_{max}}$	0.50	0.52	4%
$F_{ax_{max}}$	420	429	2%
$M_{bl_{max}}$	3926	4034	2.7%
AEP	6.69	6.89	3%

표 5 에어포일에 따른 성능, 하중

2.7 코드와 트위스트 각 분포의 결정

에어포일의 선정과 배치가 결정되면 최대의 AEP를 얻기 위한 코드와 트위스트 각의 분포는 한 가지로 결정된다. 이는 기본적으로 최대 효율을 위해서는 에어포일이 받는 받음각이 최대 C_l/C_d 가 되도록 결정되어야하면 스펠방향에 대해 axial

induction factor가 1/3을 유지하도록 BEMT에서 설계하여야 하기 때문이다. 실제로 구배법, 유전적 알고리즘에 의한 최적설계법, 역설계 기법 등을 각각 적용하여 보아도 거의 같은 결과를 얻을 수 있다. 이는 가변속 운전인 경우 이 경우가 유지되는 TSR로 정격풍속 이하에서는 대부분 운전되기 때문에 이상적인 운전조건에 가깝게 유지되어 코드와 트위스트각은 하나의 분포로 결정되게 된다. 이러한 코드와 트위스트각의 분포는 이전에 계속 보여져왔던 코드와 트위스트 각 분포를 결정하는 것에 적용되어왔다.

3. 결론

본 연구에서는 블레이드 공력 설계의 주요 변수들의 영향에 대하여 살펴 보았다. 주요 영향으로는 현재 블레이드 설계 방법에 있어서 최대 Cp의 증가는 에어포일의 선택과 두께 분포에 의해서만 영향을 받는다. 코드와 트위스트 분포는 최대 Cp를 위해서는 현재의 최적 설계 방법을 적용하면 무리 없이 이루어진다. 그러나 최대 Cp가 아닌 하중과 공탄성의 영향, 제작성을 고려하면 추가적인 수정이 들어가야한다. 실제 블레이드 설계에 있어서 가장 어려운 점은 블레이드 길이의 결정이다. 블레이드 길이는 AEP와 cost에 모두 영향을 주며 이는 오랜 경험을 통하여 결정하여야 할 것으로 판단된다. 본 연구를 통하여 블레이드 공력 설계에 있어서 기존의 블레이드 값을 그대로 따르는 것이 아니라 각각의 변수가 어떤 영향을 미치며 이에 따라 적절한 변수를 결정하는데 도움이 되기를 기대한다.

참고문헌

- [1] The evolution of rotor and blade design, James L. Tangler, NREL/CP-500-28410, Jul. 2000
- [2] Blade design trade-offs using low-lift airfoils for stall-regulated HAWTs, P.Giguere, M.S. Selig, J.L. Tangler, ASME/AIAA wind energy symposium Jan., 1999
- [3] Design of a tapered and twisted blade for the NREL combined experiment rotor, P.Giguere, M.S. Selig, NREL/SR-500-26173, Apr. 1999
- [4] Design of a 21m blade with Riso-A1-airfoils for active stall controlled wind turbines, Peter Fuglsang, Ole Sangill, Peter Hansen, Riso-R-1374(EN), Dec. 2002
- [5] Optimization method for wind turbine rotors, P.Fuglsang, H.A. Madsen, Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, May. 1998
- [6] Applied computational aerodynamics, P.A. Henne, AIAA
- [7] 수평축 풍력발전기 블레이드의 공력 성능 및 하중과 소음예측을 위한 수치적-실험적 연구, 신형기, 서울대학교 박사학위 논문, 2005.

- [8] NREL Advanced Research Turbine(ART) aerodynamic design of ART-2B rotor blades, Dayton A. Griffin, NREL/SR-500-28473, Aug. 2000