



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

초대형 풍력발전기를 위한 플랫백
블레이드의 공력소음 특성에 관한
수치적 연구

Numerical Investigation of Aeroacoustic
Characteristics of a Flatback Blade for Large-Scale
Wind Turbines

2016 년 2 월

서울대학교 대학원

기계항공공학부

김 재 현

요약 (국문초록)

플랫백 익형을 적용한 초대형 풍력발전기 로터의 공력 소음 특성에 대한 해석을 수행하였다. 익형자체소음에는 기존 Brooks, Pope, Marcolini의 반경험식과 플랫백 익형 소음해석을 위해 고안된 식을 활용하였으며, 난류 유입 소음에는 Lowson의 반경험식을 활용하였다. 전산유체역학을 이용한 유동해석과 와류 격자 기법(Vortex Lattice Method)을 이용하여 소음 계산에 필요한 정보를 도출하였다. 美 Sandia 국립 연구소의 BSDS(Blade System Design Study) 블레이드를 활용하여 로터 공력 소음 해석 기법에 대한 검증을 수행하였고 비교적 타당한 결과를 확인하였다. 초대형 풍력발전기에 플랫백 익형을 적용할 경우 블런트 뒷전 와류 흘림 소음도가 증가하였지만, 저주파 대역에서 발생하기 때문에 사람의 청감 특성(A-weighting)을 고려할 경우 문제가 될 만한 소음도 변화는 없는 것으로 나타났다. 추가적으로, 풍력발전기 소음의 Amplitude Modulation 특성을 고려한 청감실험이 필요할 것으로 판단된다.

주요어 : 플랫백 익형, 대형 풍력발전기, 공력 소음

학 번 : 2014-20677

목 차

요 약 (국문초록)	i
목 차	ii
그림 목차	iv
표 목차	v
1. 서 론	1
1.1. 연구 배경 및 목적	1
2. 수치해석 기법	4
2.1. 해석 절차	4
2.2. 익형 유동 해석	5
2.3. 로터 공력 해석	6
2.4. 로터 소음 해석	7
2.4.1. 난류 경계층 뒷전 소음	8
2.4.2. 블런트 뒷전 와류 흘림 소음	9
2.4.3. 난류 유입 소음	10
2.5. 해석 기법 검증	11
2.5.1. 풍력발전기 모델	11
2.5.2. 로터 공력 소음 해석	15
3. 결과 및 논의	23
3.1. 풍력발전기 모델	23
3.2. 로터 공력 소음 예측	24
4. 결 론	38
참고문헌	39
Abstract	42

그림 목차

그림 1.1 풍력발전기 크기의 변화 추세	3
그림 1.2 TU-Delft의 DU97-W-300 익형과 DU97-flatback 익형 형상	3
그림 2.1 해석 절차	4
그림 2.2 BSDS 플랫백 블레이드의 구성도	11
그림 2.3 BSDS 익형 형상	13
그림 2.4 받음각에 따른 양력 계수 및 항력 계수 분포; S830	17
그림 2.5 받음각에 따른 양력 계수 및 항력 계수 분포; S831	17
그림 2.6 날개 뒷전 부근의 속도 벡터장; (a) FB2700-0230, (b) FB3423-0596	18
그림 2.7 날개 뒷전 부근의 속도 벡터장; (a) FB4286-0802, (b) FB5487-1216	18
그림 2.8 BSDS 로터 출력 계산 결과	21
그림 2.9 BSDS 로터 정격속도에서의 후류 순환값	21
그림 2.10 Strip theory를 위한 세그먼트(segment) 구분	22
그림 2.11 음압(Sound Pressure Level) 비교	22
그림 3.1 출력 설계값과 해석값 비교	24
그림 3.2 플랫백 적용, 미적용 블레이드 간 출력값 비교	25
그림 3.3 후류 구조; (a) 플랫백 미적용, (b) 플랫백 적용	25
그림 3.4 40% flatback 격자 구조	27
그림 3.5 35% flatback 격자 구조	27
그림 3.6 30% flatback 격자 구조	27
그림 3.7 40% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°	28

그림 3.8 35% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°	28
그림 3.9 30% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°	28
그림 3.10 35% 플랫폼 익형 수치해석 결과와 실험값 비교; (a)양력계수 (b)항력계수	29
그림 3.11 30% 플랫폼 익형 수치해석 결과와 실험값 비교; (a)양력계수 (b)항력계수	29
그림 3.12 IEC 61400-11 규정에 따른 소음 측정 위치 측면도	32
그림 3.13 IEC 61400-11 규정에 따른 소음 측정 위치 평면도	32
그림 3.14 IEC 61400-11 규정에 따른 4곳의 수음자 기준 위치에서의 소음 측정 결과	33
그림 3.15 해석 지점 1에서 소음원별 스펙트럼; w/o flatback	34
그림 3.16 해석 지점 1에서 소음원별 스펙트럼; w/ flatback	34
그림 3.17 A-weighting; point (1)	36
그림 3.18 A-weighting; point (2)	36
그림 3.19 A-weighting; point (3)	36
그림 3.20 A-weighting; point (4)	36
그림 3.21 IEC 61400-11 규정에 따른 4곳의 수음자 기준 위치에서 flatback 익형 적용, 미적용, r/R=0.263까지 flatback 익형 적용 시에 따 른 소음 측정 결과	37

표 목차

표 2.1 BSDS 로터 블레이드 형상 구조	12
표 2.2 BSDS 로터 블레이드 제원	12
표 2.3 BSDS 로터 파워 출력 값	14
표 3.1 초대형 풍력발전기 사양	23
표 3.2 블레이드 구성 익형 비교	23

1. 서 론

1.1. 연구 배경 및 목적

풍력 발전 사업은 그 자원이 무한하며 대규모로 운용할 경우 발전 단가가 비교적 낮다는 장점이 있어 화석연료를 이용한 발전 사업의 대체 에너지로 각광 받아 많은 연구가 이루어져 오고 있다.

풍력발전기의 로터 직경을 크게 하고 타워의 높이를 길게 설계하면 상공의 강한 풍속을 많이 확보할 수 있어 에너지 효율을 높일 수 있다. 이와 같은 이유로 풍력발전기를 대형화 시키려는 노력이 이루어지고 있지만, 그에 따른 설치비용 문제, 구조적 안정성 문제가 발생하게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 더 강하고 가벼운 블레이드를 만들려고 하는 노력이 이루어지고 있다. 그 예로, 미국 샌디아 국립 연구소(Sandia National Laboratories, SNL)에서는 두꺼운 날개 뒷전을 갖는 플랫폼 익형(flatback airfoil)을 블레이드 인보드(inboard) 영역에 설치함으로써 재료비용 절감 및 구조적 안정성을 향상시키고자 하였다. 구조적 안정성을 갖게 되는 이유는 플랫폼 형상으로 익형을 설계하면 코드길이를 증가시키지 않고 두꺼운 익형을 만들 수 있어, 구조적으로 compact한 설계가 가능해지기 때문이다. 또한 설치 시에 운반이 용이해진다는 장점이 생긴다[1]. 하지만, 블레이드의 항력을 증가시키고, 두꺼운 날개 뒷전으로 인해 강한 역회전 와류 흘림이 발생하게 된다[2]. 그 결과, 준분절음에 해당하는 강한 블런트 뒷전 와류 흘림 소음이 발생하게 된다. 플랫폼 익형을

적용한 블레이드가 구조적 안정성을 향상시키더라도 문제가 될만한 소음도 변화가 발생하면 이 또한 문제가 될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 초대형 풍력발전기에 플랫백 익형을 적용할 경우 로터의 공력 소음 측면에서 현저한 변화가 발생하는지 예측하는 것을 목표로 하였다. 먼저, 향상된 반경험식을 통해 플랫백 익형의 소음 특성을 확인하고 풍력발전기 로터 소음해석 기법에 대한 타당성 검증을 수행하였다. 최종적으로, 플랫백 익형이 적용된 초대형 풍력발전기의 소음도 변화를 예측하였다.

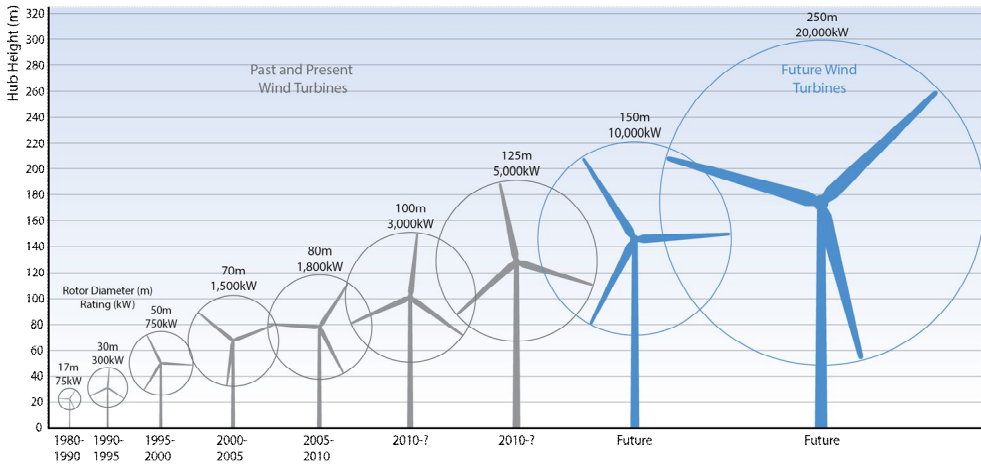


그림 1.1 풍력발전기 크기의 변화 추세[3]

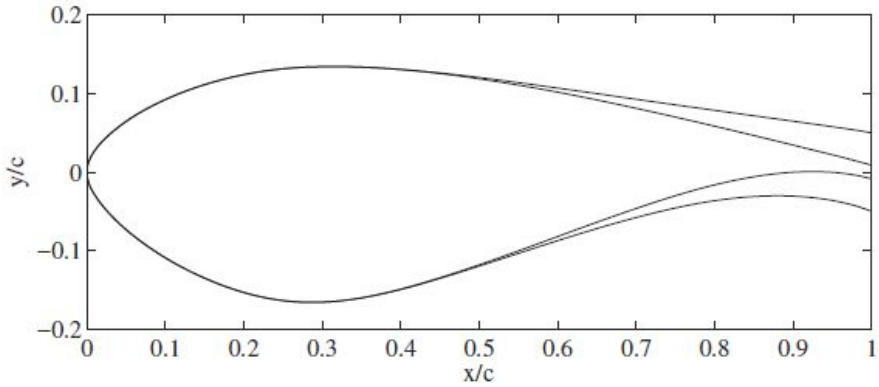


그림 1.2 TU-Delft의 DU97-W-300 익형과 DU97-flatback 익형 형상[4]

2. 수치해석 기법

2.1. 해석 절차

블레이드 형상, 작동 조건등을 이용하여 유동해석을 진행하게 된다. 풍력발전기 로터로 유입되는 속도(inflow velocity), 유효 받음각(effective angle of attack) 등을 구하기 위해서 Vortex lattice method에 기반한 공력해석을 수행한다. 본 연구에 사용된 소음 기법을 위해서는 익형의 윗면 아랫면에 대한 경계층 정보가 필요하다. 이러한 정보를 얻기 위해 뒷전이 날카로운 일반적인 형상의 익형에 대해서는 2차원 상용 패널 프로그램인 x-foil을 사용하였고, 날개 뒷전이 두꺼워 x-foil로 계산을 할 수 없는 플랫백 익형에 대해서는 전산유체역학을 이용한 유동해석을 수행하였다. 앞서 구한 모든 정보는 플랫백 익형 소음해석을 위한 향상된 반경험식(modified semi-empirical formula)에 Input 데이터로 활용하게 된다 .

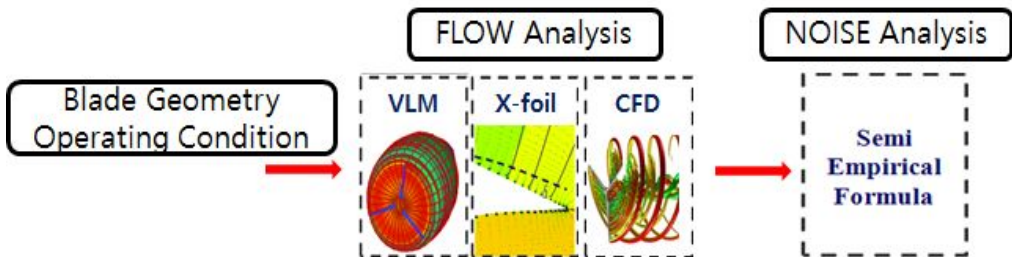


그림 2.1 해석 절차

2.2. 익형 유동 해석

RANS 해석 시 레이놀즈 평균값을 구하는데 있어 순간적인 Navier-Stokes 방정식의 솔루션 변수들은 앙상블(ensemble) 평균값 또는 시간 평균값과 주기적으로 변하는 요소로 분해되며, 속도 성분에 대한 값은 다음과 같다.

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (2.1)$$

여기서 \bar{u}_i 와 u'_i 은 평균값과 변동 속도 성분이며($i = 1, 2, 3$), 마찬가지로 scalar 양에 대해서는 다음과 같다.

$$\phi = \bar{\phi} + \phi' \quad (2.2)$$

유동 변수들에 대하여 위와 같은 형태를 순간적인 연속 방정식 및 모멘텀 방정식에 대입하고 시간 평균 또는 앙상블 평균을 내면 평균 모멘텀 방정식이 구해지고 이를 카르테시안 텐서 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(p u_i) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\overline{p u_i u_j}) \quad (2.4)$$

위의 방정식을 Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) 방정식이라고 하며, 순간적인 Navier-Stokes 방정식과 같은 일반적인 형태를 갖고 추가적인 항들은 난류 효과를 나타낸다[5].

2.3. 로터 공력 해석

Vortex lattice method를 기반으로 공력 해석을 수행하였다. 블레이드 주위는 비점성, 비회전, 비압축성 유동으로 모사한다. 포텐셜 유동 (potential flow)은 라플라스 방정식(Laplace equation)을 만족하게 되며, 그린의 정리(Green's theorem)를 이용하면 소스와 더블릿의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\Phi^* = \frac{1}{4\pi} \int_{body+wake} \gamma n \cdot \nabla \left(\frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (2.5)$$

블레이드 표면에서의 수직 속도 성분은 0이며(Neumann boundary condition), 블레이드에 의한 유동 교란 정도는 블레이드로부터 멀어질수록 줄어든다. vortex sheet에 의해 발생하는 공기역학적 힘은 Kutta-Joukowski theorem에 의해 계산된다[6]. 블레이드 요소 및 후류 요소에 의한 속도 성분은 Biot savart 법칙으로 구하고, 3차원 회전익에서 발생하는 스톨 지연 현상(stall delay effect)을 고려하기 위해 Du & Selig stall delay[7] 모델을 사용하였다. 실속이나 유동 박리, 두께효과와 캠버효과를 적절히 고려하기 위해 포텐셜 유동으로부터 구한 공력 데이터와 table look-up으로 구한 공력 데이터 간의 차이를 줄이기 위해 iteration하는 과정에서 비선형 와류 보정 기법(nonlinear vortex correction method)을 사용하였다[8, 9]. Newton-Raphson 방법[10]을 이용하여 iteration을 수행하였다.

2.4. 로터 소음 해석

Brooks, Pope, Marcolini의 익형 자체 소음(airfoil self noise)[11] 및 Lowson의 난류 유입 소음(turbulence ingestion noise)[12,13] 반경험식(semi-empirical formula)을 기반으로 주파수 영역에 대하여 로터 소음 해석을 수행하였다. 익형 자체 소음 반경험식은 NACA0012 익형을 이용한 풍동 실험을 기반으로 개발한 것이다. 기본적인 과정은 실험, 스케일링(scaling), 계산 및 검증으로 진행된다.

로터 해석은 블레이드를 여러 구간으로 나누어 각각의 구간을 독립된 소음원으로 가정하였으며, 로터 회전에 따른 각 구간에서 수음자까지의 거리 및 각도 등을 고려(directionality)하여 소음도를 계산하였다.

플랫백 익형의 블런트 뒷전 와류 흘림 소음(trailing edge bluntness vortex shedding noise)은 기존 Brooks, Pope, Marcolini의 반경험식으로는 한계가 있어 본 연구에서는 평판에서 Blasius 해와 레이놀즈수 및 스트로우홀 수의 상관관계를 통하여 새롭게 제시된 식[14]을 사용하였다.

2.4.1. 난류 경계층 뒷전 소음

난류 경계층 뒷전 소음(turbulent boundary layer trailing edge noise)은 블레이드 표면에 형성된 난류 경계층이 블레이드 뒷전과 만나서 발생하는 소음이다. 난류 경계층 뒷전 소음에 대한 scaling은 Ffowcs Williams와 Hall[15]의 edge-scatter formulation을 기반으로 한다[11].

$$SPL_{TBLTE} = 10\log(10^{SPL_\alpha/10} + 10^{SPL_s/10} + 10^{SPL_p/10}) \quad (2.6)$$

$$SPL_p = 10\log\left(\frac{\delta_p^* M^5 L \overline{D_h}}{r_e^2}\right) + A\left(\frac{St_p}{St_1}\right) + (K_1 - 3) + \Delta K_1 \quad (2.7)$$

$$SPL_s = 10\log\left(\frac{\delta_p^* M^5 L \overline{D_h}}{r_e^2}\right) + A\left(\frac{St_s}{St_1}\right) + (K_1 - 3) \quad (2.8)$$

$$SPL_\alpha = 10\log\left(\frac{\delta_p^* M^5 L \overline{D_h}}{r_e^2}\right) + B\left(\frac{St_s}{St_2}\right) + K_2 \quad (2.9)$$

식 (2.7)은 익형 아랫면(pressure side)에 대한 소음도, 식 (2.8)은 익형 윗면(suction side)에 대한 소음도, 식(2.9)는 받음각에 따른 소음도를 나타낸다. 각 기호에 대한 설명은 참고문헌[11]에 기술되어 있다.

2.4.2. 블런트 뒷전 와류 흘림 소음

블런트 뒷전 와류 흘림 소음(trailing edge bluntness vortex shedding noise)은 블레이드 뒷전이 뭉툭해서 와류 진동이 생성되어 발생하는 소음이다. 먼저 최대 소음도(G_4)를 구하고 최대 소음도에 해당하는 주파수를 구한 뒤에 스펙트럼 모양(G_5)을 구하는 방식으로 구성 된다[11].

$$SPL_{blunt} = 10 \log \left(\frac{hM^{5.5} \Delta L \bar{D}_l}{r^2} \right) + G_4 \left(\frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi \right) + G_5 \left(\frac{h}{\delta_{avg}^*}, \Psi, \frac{St'''}{St_{peak}'''} \right) \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} St_{peak}''' &= 0.1 \left(\frac{h}{\delta_{avg}^*} \right) + 0.095 - 0.00243\psi \quad \left[\frac{h}{\delta_{avg}^*} < 0.2 \right] \\ St_{peak}''' &= \frac{0.212 - 0.0045\psi}{1 + 0.235 \left(\frac{h}{\delta_{avg}^*} \right)^{-1} - 0.0132 \left(\frac{h}{\delta_{avg}^*} \right)^{-2}} \quad \left[0.2 \leq \frac{h}{\delta_{avg}^*} \leq 10 \right] \\ St_{peak}''' &= 0.1461 + \frac{1}{400} \left[\left(\frac{h}{\delta_{avg}^*} \right)^{-1} - 12 \right]^2 \quad \left[10 < \frac{h}{\delta_{avg}^*} \right] \end{aligned} \quad (2.11)$$

앞서 언급했듯이 플랫폼 익형의 블런트 뒷전 와류 흘림 소음은 기존 반경험식으로는 한계가 있어 본 연구에서는 평판에서 Blasius 해와 레이놀즈수 및 스트로우홀 수의 상관관계를 통하여 새롭게 제시된 식[14]을 사용하였다. 각 기호에 대한 설명은 참고문헌[11]에 기술되어 있다.

2.4.3. 난류 유입 소음

난류 유입 소음(turbulence ingestion noise)은 대기 중의 난류가 로터로 유입되었을 때 블레이드 표면에 비정상 표면 압력(unsteady surface pressure)이 발생하면서 생성되는 소음이다. Lowson이 제안한 반경험식 모델에 의하면, 주파수 스펙트럼은 다음과 같다[12,13].

$$SPL_{TIN} = SPL_{TIN}^H + 10 \log_{10} \left\{ \frac{K_{lc}}{1 + K_{lc}} \right\} \quad (2.12)$$

$$SPL_{TIN}^H = 10 \log_{10} \left\{ \rho^2 c_0^2 L \frac{\Delta l}{r^2} M^3 I^2 k^3 (1 + k^2)^{-7/3} \right\} + 58.4 \quad (2.13)$$

$$l_T = 25h^{0.35} z^{-0.063} \quad (2.14)$$

$$\bar{w} = \left\{ 0.24 + 0.096 \log_{10} z + 0.016 (\log_{10} z)^2 \right\} \frac{\log(30/z)}{\log(h/z)} \quad (2.15)$$

K_{lc} 는 저주파 보정 계수, l_T 는 turbulence length scale, \bar{w} sms 난류 강도(turbulent intensity)를 나타낸다. 식(2.14)와 식(2.15)에서 알 수 있듯이 turbulence length scale 및 난류 강도는 지표면의 거칠기와 높이로 구성된 경험식이다[16].

2.5. 해석 기법 검증

2.5.1. 풍력발전기 모델

본 연구에서 사용한 풍력발전기 로터 공력 성능 해석 및 소음 해석에 대한 기법 검증을 위하여 美 Sandia Lab의 BSDS (Blade System Design Study) 로터를 활용하였다[17].

BSDS 로터의 블레이드 형상 및 제원은 다음과 같으며, 로터 반경은 9m, 블레이드 길이는 8.375 m로 정격 풍속 13.3 m/s에서 약 106 kW의 정격 출력을 발생하도록 설계되었다. 블레이드 반경의 65%까지 FB6300-1800을 비롯한 총 5종류의 플랫폼 익형이 포함되어 있으며, 블레이드 아웃보드(outboard)는 일반 익형 형상을 갖는 S830과 S831 익형으로 구성되어 있다.

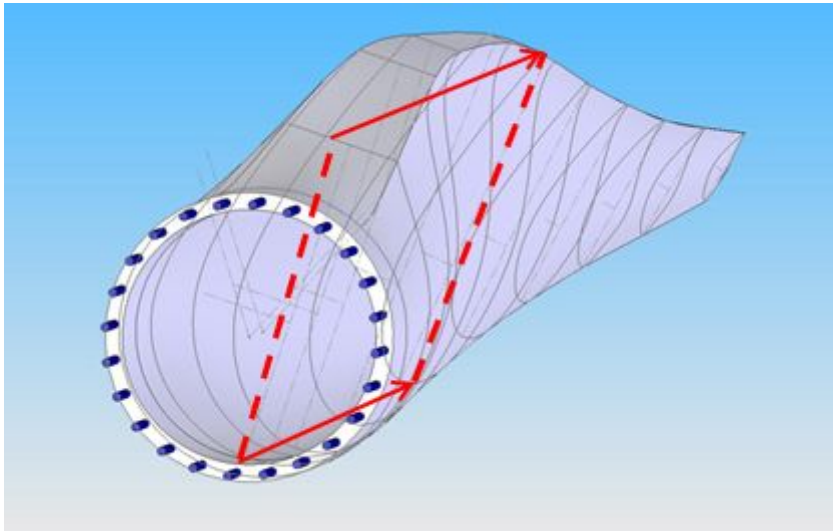


그림 2.2 BSDS 플랫폼 블레이드의 구성도

표 2.1 BSDS 로터 블레이드 형상 구조

r/R	Radius(mm)	Chord(mm)	AeroTwist(°)	Airfoil Table
0.05	450	519	12	Circle
0.15	1350	610	12	FB 6300-1800
0.25	2250	792	11.9	FB 5487-1216
0.35	3150	764	9.0	FB 4286-0802
0.45	4050	656	6.4	FB 3423-0596
0.55	4950	521	4.3	FB 2700-0230
0.65	5850	414	2.6	FB 2700/S830
0.75	6750	312	1.3	S830
0.85	7650	230	0.5	S830/31
0.95	8550	147	0.1	S831

표 2.2 BSDS 로터 블레이드 제원

Span Length (w/ Hub)	9,000 mm
Blade Root Location	7.50% span
Blade Root Location	675 mm
Blade Length	8,325
Rated Wind Speed	13.3 m/s
Rated Rotor Speed	56.6 rpm

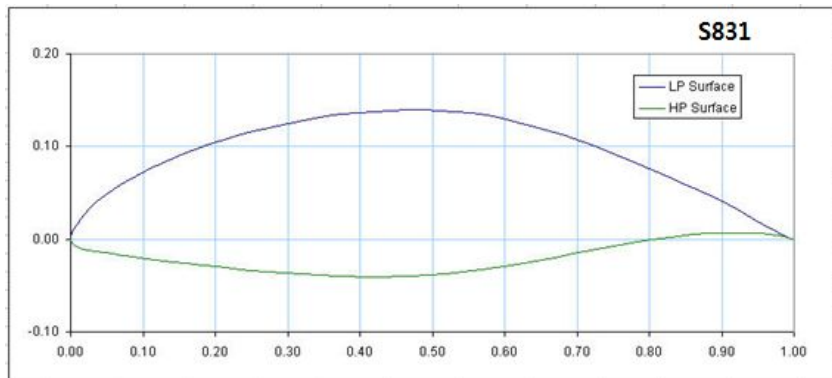
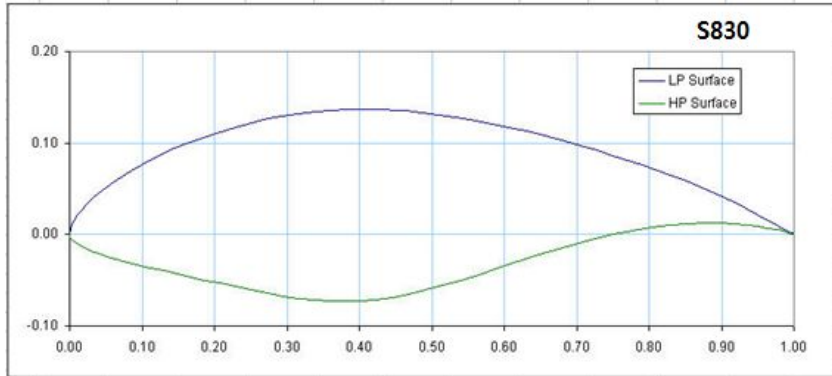
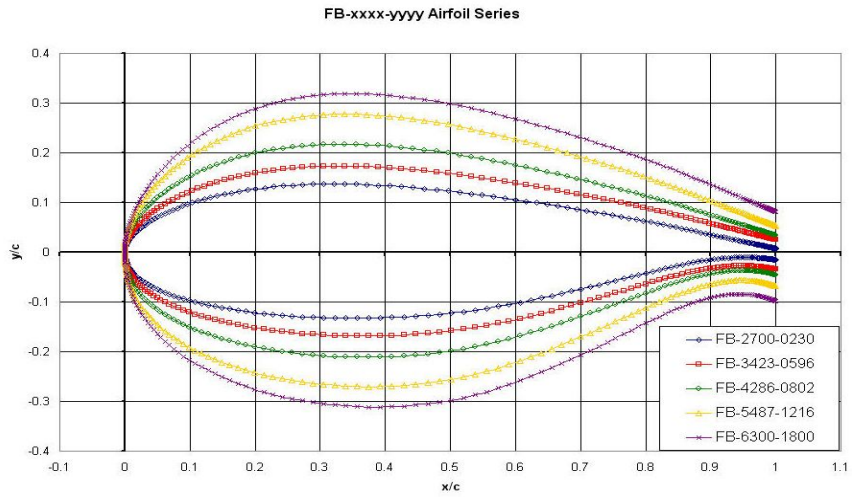


그림 2.3 BSDS 익형 형상

표 2.3 BSDS 로터 파워 출력 값

Wind Speed (m/s)	Rotor Speed (RPM)	Aerodynamic Power (kW)
2.9	55.5	0.5
3.5	55.5	1.5
4.0	55.5	3.6
4.4	55.5	4.5
4.8	55.5	6.8
5.2	55.6	9.9
5.8	55.6	14.6
6.6	55.7	21.6
7.0	55.7	26.3
7.5	55.8	31.7
8.1	55.9	38.2
8.8	56.0	46.6
9.6	56.1	57.6
10.6	56.3	72.3
11.8	56.4	89.8
12.5	56.5	97.3
13.3	56.6	106.1

2.5.2. 로터 공력 소음 해석

와류 격자 기법(Vortex Lattice Method) 및 향상된 반경험식(Modified Semi-empirical method) 등을 이용한 소음 해석을 위해서 구간별 익형에 대한 유동 해석 정보(양력 계수, 항력 계수, 모멘트 계수, 경계층 정보 등)가 필요하다. 이에 따라, 패널 기법에 기반하고 있는 2D 상용 유동 해석 코드인 X-Foil[18]을 이용하여 앞서 언급한 유동 해석 정보를 구하였다.

그림(2.4), (2.5)는 아웃보드 구간에 해당하는 S830 익형과 S831 익형에 대해 받음각이 0도에서 12도로 변화함에 따라 발생하는 양력 계수 및 항력 계수 변화 분포를 나타낸다. 운용 조건을 고려하여 각각 8.65×10^5 , 5.09×10^5 의 레이놀즈수에 대하여 계산하였다. 받음각이 증가함에 따라 항력계수 값이 커지며, 레이놀즈수, 익형의 형상으로 인해 S831 익형의 경우 S830 익형에 비해 항력 계수가 전반적으로 큰 것을 확인할 수 있었다.

X-Foil은 뒷전이 날카로운 익형에 대해서 해석 결과가 타당한 반면, 뒷전이 두꺼운 플랫백 익형의 경우 해가 수렴하지 않고 발산하게 된다. 이에 따라, FB6300-1800, FB5487-1216, FB4286-0802, FB3423-0596, FB2700-0230 총 5개의 플랫백 익형에 대한 유동 해석 정보를 계산하기 위하여 상용툴인 Fluent를 사용하였다. 익형의 시위 대비 두께 35%, 뒷전에서의 시위 대비 뒷전 두께가 17.5%인 FB3500-1750 익형을 대상으로 난류 모델 시험을 수행한 데이터[19]에 의하면 Transition SST(shear stress transition) 난류 모델이 타당한 결과를 보여줬기 때문에 해당 난류 모델을 활용하여 유동해석을 진행하였다.

레이놀즈수 6.6×10^5 , 받음각 0도에서 FB5487-1216, FB4286-0802, FB3423-0596, FB2700-0230에 대한 유동해석 후 날개 뒷전 부근의 속도 벡터장을 그림(2.6),(2.7)에 나타내었다. 익형의 두께비(t/c)가 클수록 날개 뒷전의 boundary layer thickness 값이 증가하며, 표면 기울기가 큰 흡입면(suction side)에서 더욱 잘 확인됨을 알 수 있다. 유동이 익형 뒷전으로 흘러가면서 표면에서의 유동 속도가 줄어들기 때문에 압력의 크기는 증가하게 된다. 또한, 익형 벽면(표면)의 경계 조건을 No-slip으로 주었기 때문에 뒷전으로 갈수록 경계층 두께가 증가하는 현상을 확인할 수 있었다.

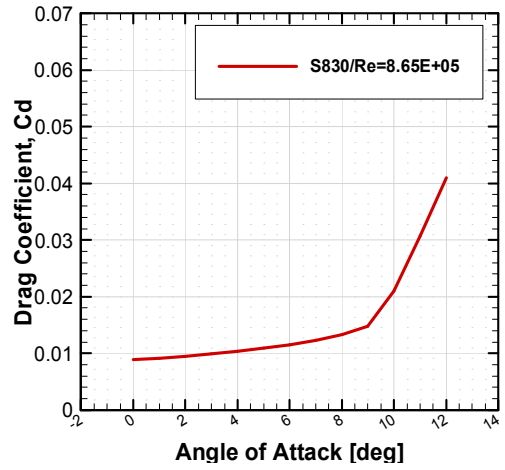
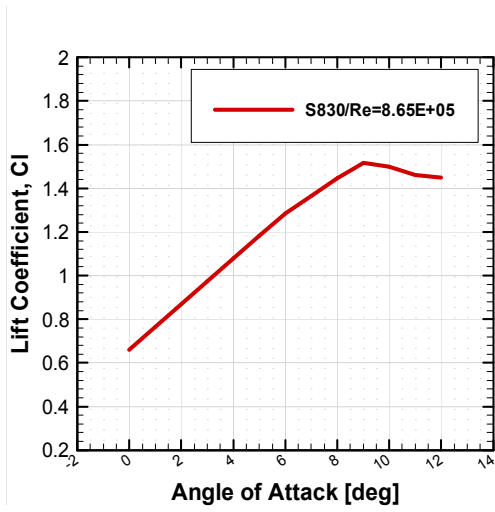


그림 2.4 받음각에 따른 양력 계수 및 항력 계수 분포; S830

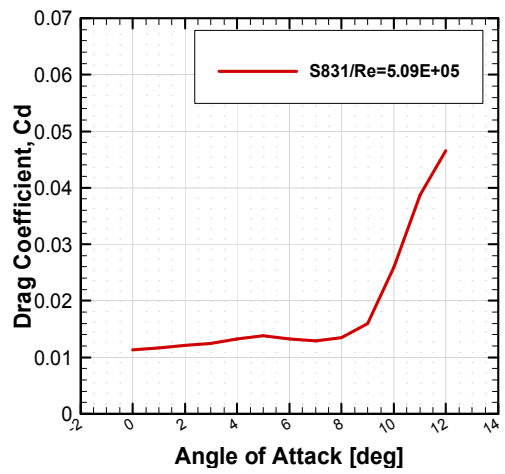
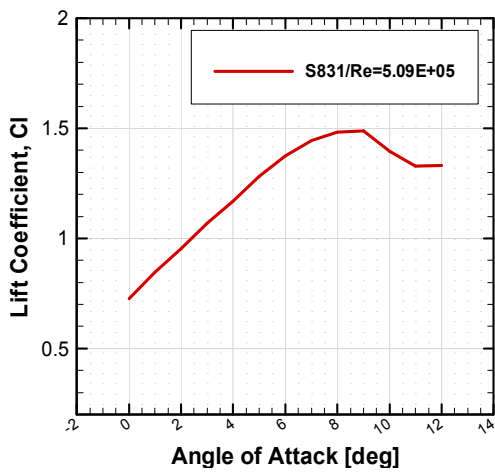


그림 2.5 받음각에 따른 양력 계수 및 항력 계수 분포; S831

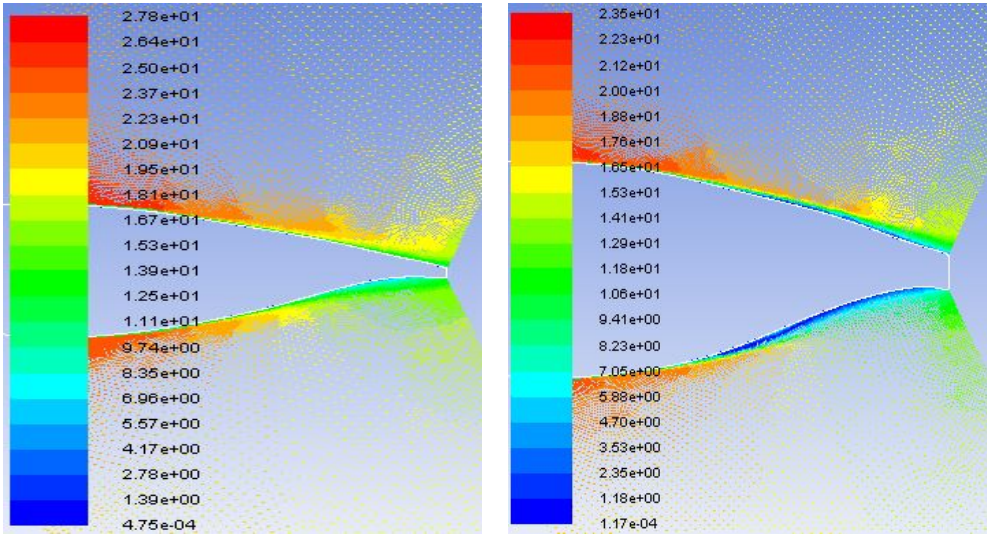


그림 2.6 날개 뒷전 부근의 속도 벡터장;
 (a) FB2700-0230, (b) FB3423-0596

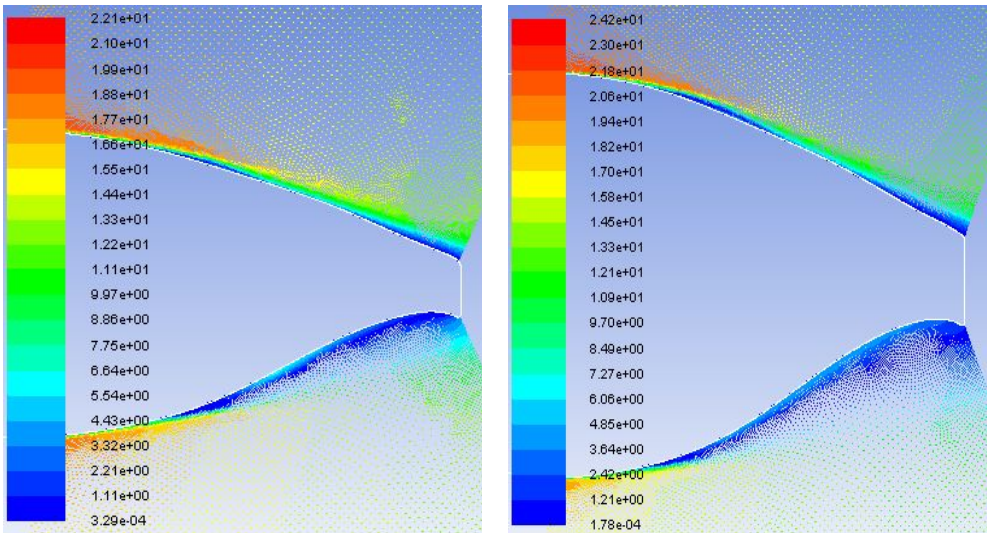


그림 2.7 날개 뒷전 부근의 속도 벡터장;
 (a) FB4286-0802, (b) FB5487-1216

정격 풍속인 13.3m/s 까지 총 10개의 풍속에 대하여 BSDS 로터의 출력을 계산하였다. 정격 풍속에 도달 할수록 다소 오차가 발생함을 보였지만 Transition based SST 4-방정식 난류모델을 이용한 유동 해석의 오차를 고려하면 시동 풍속에서 정격 풍속까지 설계치와 유사한 결과를 나타내었다고 판단 할 수 있다(그림 2.8).

앞서 구한 플랫폼 익형에 대한 유동 해석 결과를 통해 레이놀즈수 및 받음각에 따른 익형 뒷전에서의 경계층 두께와 경계층 변위 두께를 아랫면 (pressure side) 윗면(suction side)에 대해 각각 계산하고 이를 소음해석에 활용하였다.

블레이드를 총 19개의 구간으로 나누어(strip theory approach) 각각의 구간을 독립된 소음원으로 가정하였고, 각 구간으로부터 블레이드가 회전하면서 변하는 수음자 위치까지의 거리 및 각도를 방향성 함수에 반영하였다.

美 Sandia Lab 연계 하에 Bushland, TX에서 Acoustic array 기법으로 수행한 field test 결과[20]로 소음 검증을 진행하였고 그 결과는 그림 그림(2.11)과 같다. 허브에서 스펠 방향으로 플랫폼 익형 형상이 적용된 구간에 대한 실험 및 소음 결과이며, 63Hz-2500Hz 구간에 대해 1/3 옥타브(one-third-octave)로 나타내었다.

저주파 영역에서 지배적인 난류유입소음(turbulence ingestion noise)은 실제 실험 환경에 따라 크게 바뀔 수 있기 때문에 오차가 발생하였다. 본 연구에서 사용한 난류유입소음 모델에서의 난류 스케일(turbulence length scale) 및 난류 강도(turbulence intensity)는 지면의 거칠기 및 높이에 의해 결정되는데 이 값은 불규칙하며 수치에 대한 정확도가 떨어지기 때문에 오차가 발생한다. 또한, nacelle부에 위치한 기어박스 등과 같은 기계적 소음이 포함되어 있어 전반적인 소음 레벨이 높았으나, 전반

적인 경향성은 유사하게 나왔다고 판단한다. 추후에 풍동 실험으로 얻은 데이터와 해석 값을 비교하거나 동적 유입류(dynamic inflow)를 고려하여 적절한 시간 간격동안의 소음값을 비교하는 것도 좋을 것으로 생각한다.

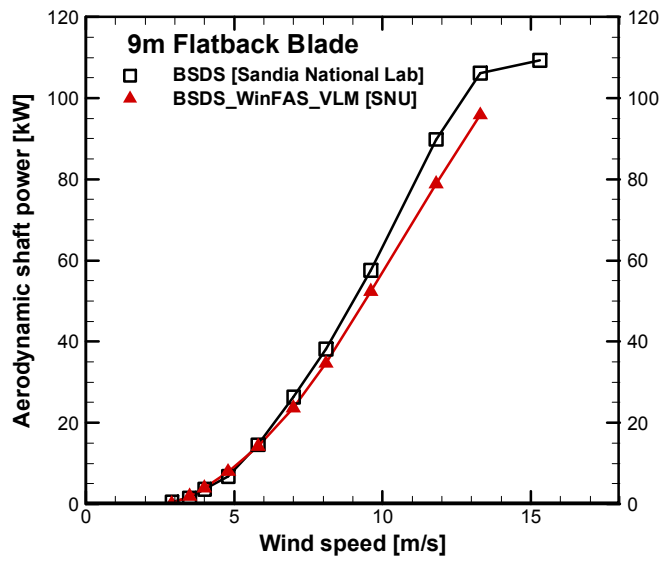


그림 2.8 BSDS 로터 출력 계산 결과

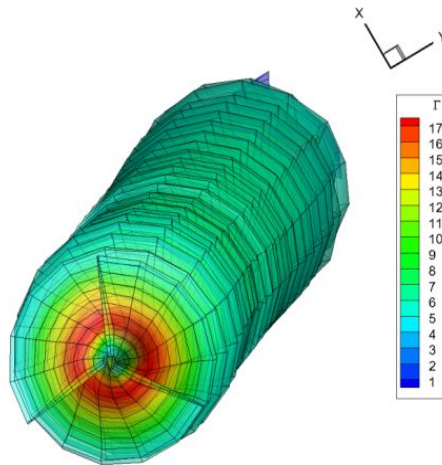


그림 2.9 BSDS 로터 정격속도에서의 후류 순환값

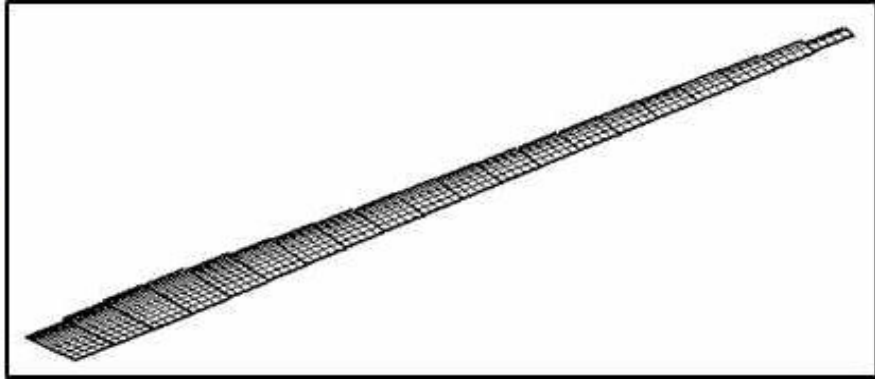


그림 2.10 Strip theory를 위한 세그먼트(segment) 구분

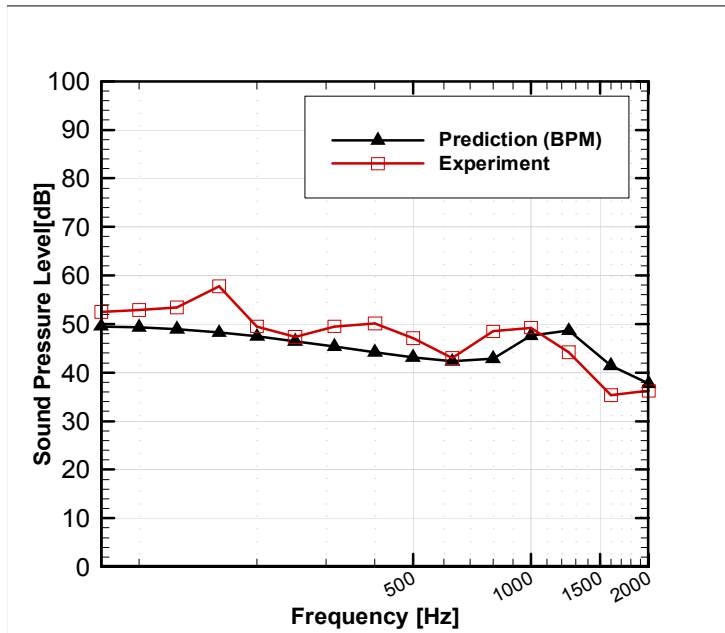


그림 2.11 음압(Sound Pressure Level) 비교

3. 결과 및 논의

3.1. 풍력발전기 모델

10MW 초대형 풍력발전기 공력 소음 예측에는 한국에너지기술연구원에서 개발한 익형을 사용하였다[21]. 풍력발전기 사양은 표(3.1)과 같이 로터의 반지름 88m, 허브 높이 150m, 블레이드 길이 85.5m, 정격 회전 속도 10rpm, 정격 풍속은 11.5m/s 이며, 피치 제어방식의 upwind 풍력발전기이다. 플랫백 블레이드의 경우, 약 $r/R=0.4$ 까지 플랫백 익형이 적용된다.

표 3.1 초대형 풍력발전기 사양

Rotor radius	88 m
Blade length	85.5 m
Rated rotor speed	10 rpm
Rated Wind Speed	11.5 m/s
Hub Height	150 m

표 3.2 블레이드 구성 익형 비교

w/o flatback blade	w/ flatback blade
cylinder	cylinder
45% airfoil	45% flatback
40% airfoil	40% flatback
35% airfoil	35% flatback
30% airfoil	30% flatback
25% airfoil	25% airfoil
21% airfoil	21% airfoil
18% airfoil	18% airfoil

3.2. 로터 공력 소음 예측

이전과 동일한 방법으로 로터 출력을 계산하였다. 기존 설계값(based on blade element momentum theory)과 해석 결과를 비교했을 때 플랫백 익형이 있는 경우와 없는 경우 모두 정격 풍속에서 약 4%의 차이가 발생하여 소음해석에 활용하는데 있어 타당함을 보였다. 그 외 풍속에서도 대체적으로 비슷한 결과를 나타내었다. 또한 플랫백 익형이 적용되었을 경우, 적용되지 않았을 때보다 약간의 power 감소를 보였으나, 그 차이는 2% 이내로 Flatback 익형 적용 시에 갖게 되는 구조적 안정성으로 인한 피로수명 증가와 재료비절감 등을 고려하였을 때 문제가 되지 않을 것으로 볼 수도 있지만 유지보수 비용, 수명을 고려하여 장기적인 측면에서 정확한 계산을 해 볼 필요가 있다고 생각한다. 또한, 추후에 설치할 지역에 대한 풍속 데이터 분석을 통한 동적 유입류(dynamic inflow)를 고려해 볼 필요가 있다.

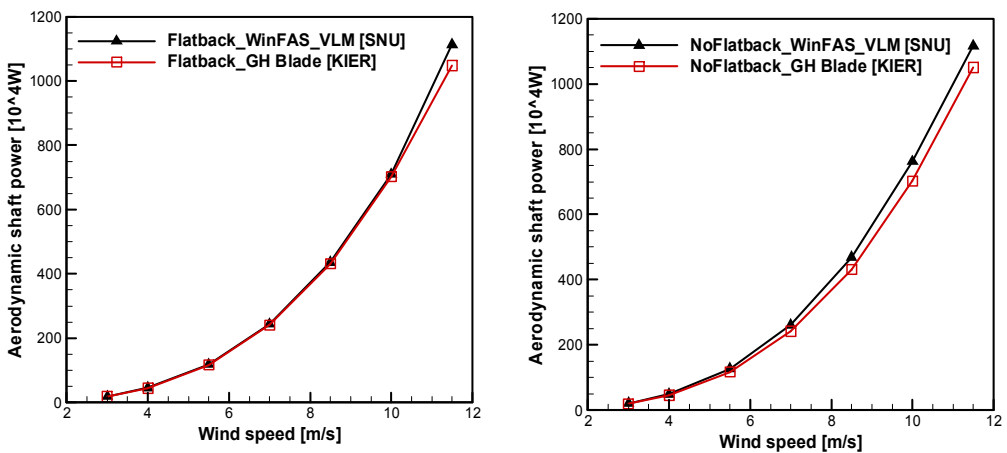


그림 3.1 출력 설계값과 해석값 비교

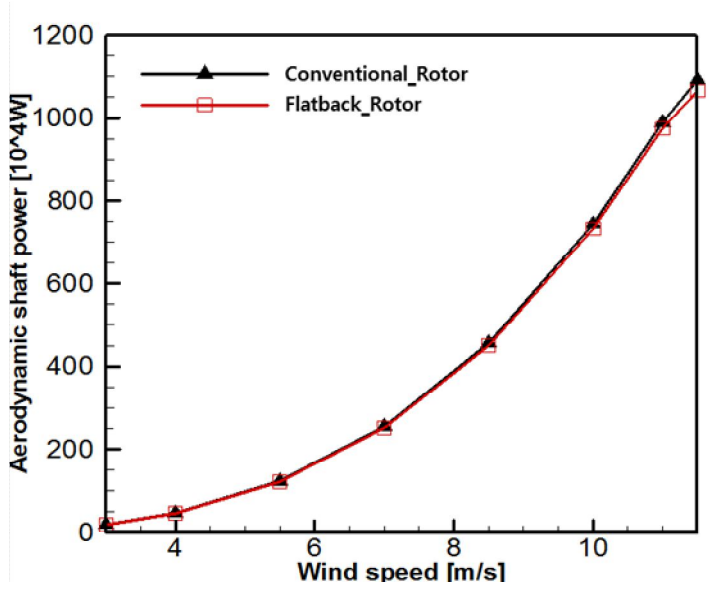


그림 3.2 플랫백 적용, 미적용 블레이드 간 출력값 비교

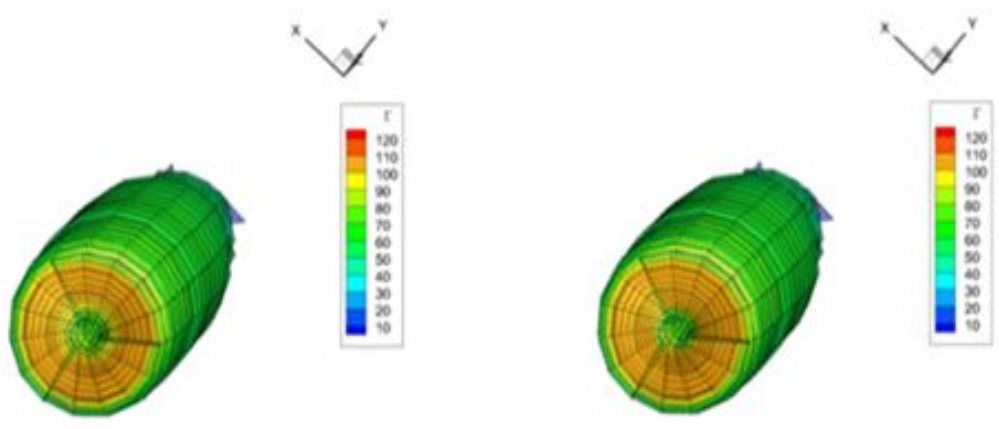


그림 3.3 후류 구조; (a) 플랫백 미적용 , (b) 플랫백 적용

소음 계산 시 필요한 경계층 정보를 계산하기 위하여 플랫폼 익형이 아닌 45%, 40%, 35%, 30%, 25%, 21%, 18% 총 7개의 익형에 대해서 Xfoil 을 이용하여 2차원 유동해석을 수행하였다.

플랫폼 익형에 대해서 Fluent를 기반으로 익형의 2차원 유동해석을 수행 하였으며, 일반적으로 양의 받음각에서 발생하는 역압력 구배 현상에 대해 잘 모사하는 Mentor[22]의 $k-\omega$ SST(shear stress transition) 난류 모델을 적용하였고, semi-empirical method for pressure linked equation을 사용하였다. 공간차분화 오차를 최소화하기 위하여 최소자승 격자기반 기법을 적용하였고, 운동량 방정식의 압력계산은 높은 정확도를 위하여 second order를 사용하였다. C-H 형태로 structured grid를 구성하였고 익형 표면의 해상도(wall grid solution) y^+ 는 1, 격자 팽창비 (grid expansion ratio)는 1.05로 하였다. 비대칭도(skewness), 종횡비 (aspect ratio) 등은 높은 정확도를 위한 기준 내에 속하도록 했다. 그림 (3.4-6)에 일부 플랫폼 익형에 대한 격자 구조를 나타내었다.

유동해석 후 받음각에 따른 각 익형의 동압(dynamic pressure)장 및 속도 벡터장을 그림(3.7-9)에 나타내었다. 익형의 두께비(t/c)가 클수록 날개 뒷전의 boundary layer thickness 값이 증가하며, 표면 기울기가 큰 흡입면(suction side)에서 더욱 잘 확인됨을 알 수 있다. 유동이 익형 뒷전으로 흘러가면서 표면에서의 유동 속도가 줄어들기 때문에 압력의 크기는 증가하게 된다. 또한, 익형 벽면(표면)의 경계 조건을 No-slip으로 주었기 때문에 뒷전으로 갈수록 경계층 두께가 증가하는 현상을 확인할 수 있었다. 플랫폼 익형의 유동 해석 결과(공력계수)를 제공 받은 실험 데이터와 비교하여 나타내었다(그림 3.10-11). 받음각 10° 이상부터 오차가 커지는 경향이 나타났지만, 본 풍력발전기는 정격 풍속에서의 거동 시, 최대 유효 받음각이 약 10도로서 해석에 큰 영향을 미치지 않았다.

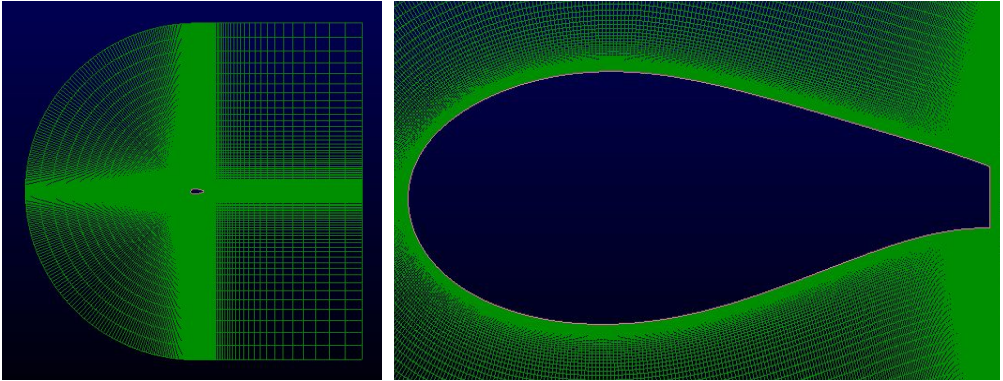


그림 3.4 40% flatback 격자 구조

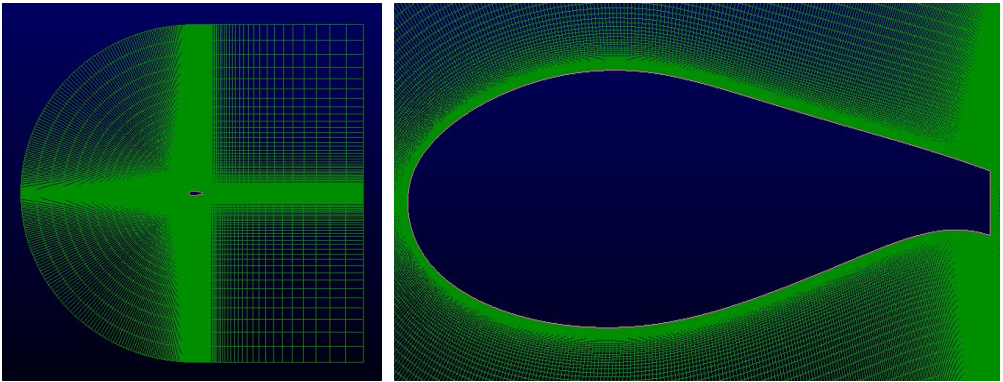


그림 3.5 35% flatback 격자 구조

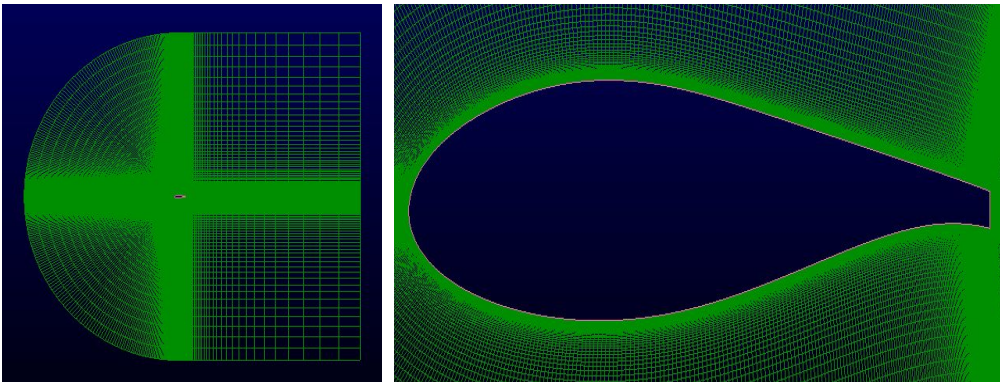


그림 3.6 30% flatback 격자 구조

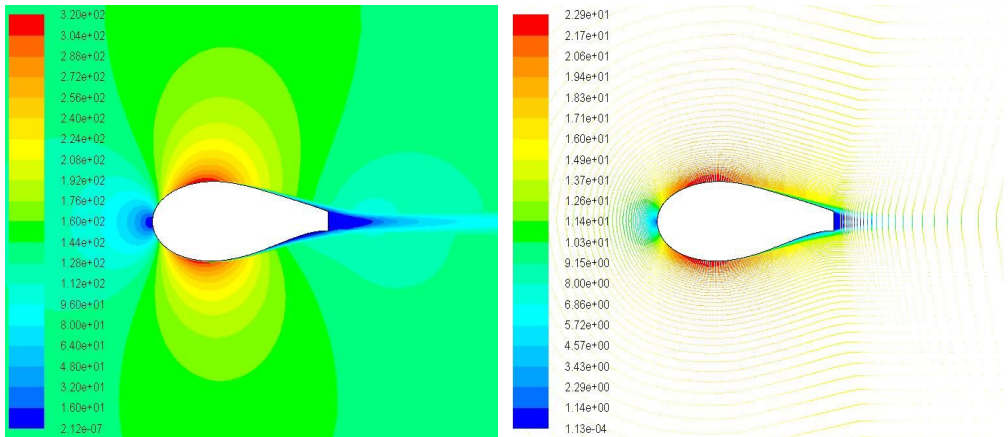


그림 3.7 40% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°

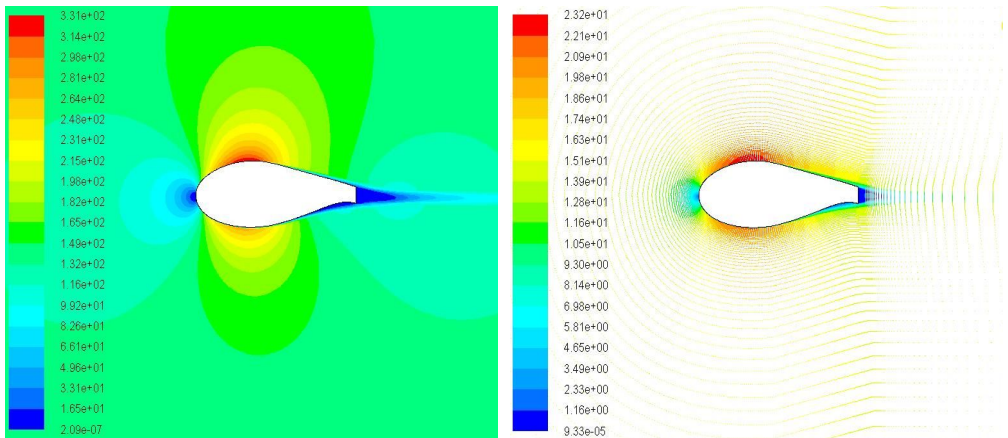


그림 3.8 35% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°

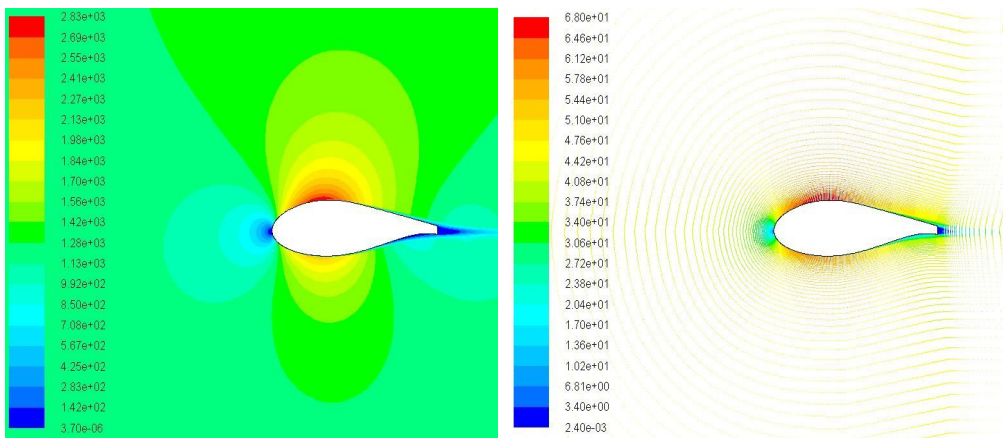


그림 3.9 30% flatback; (좌)동압장 (우)속도 벡터장, 받음각 0°

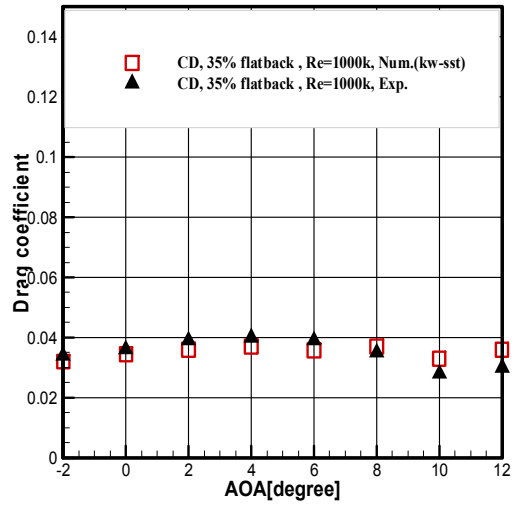
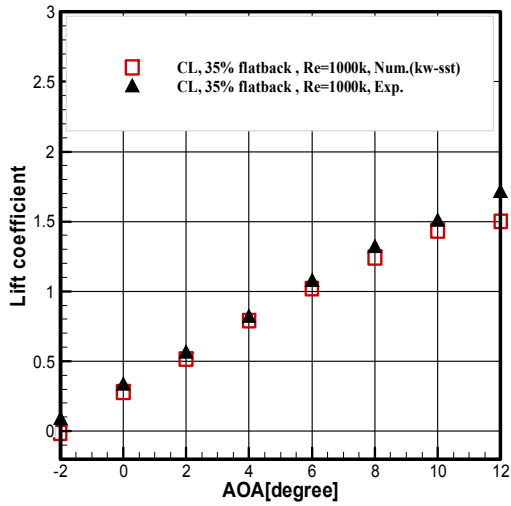


그림 3.10 35% 플랫백 익형 수치해석 결과와 실험값 비교;

(a)양력계수 (b)항력계수

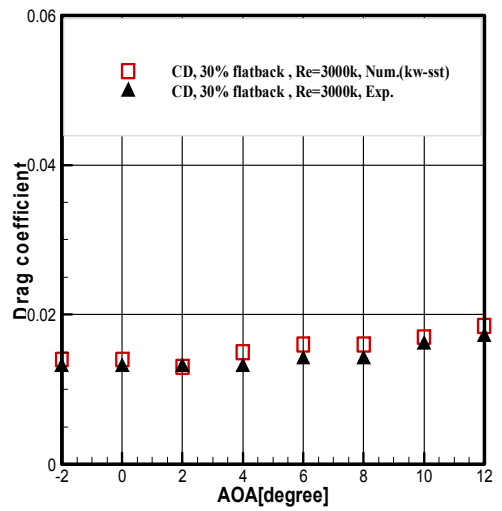
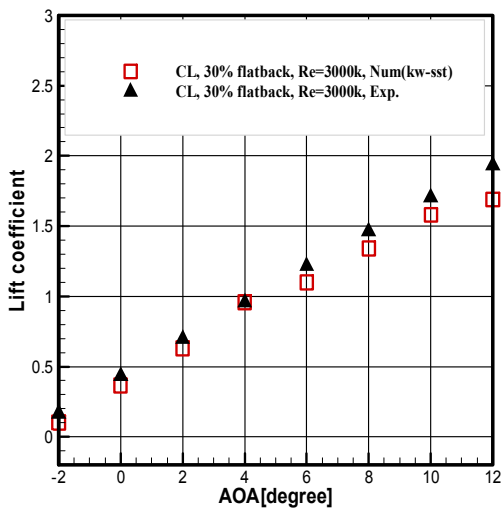


그림 3.11 30% 플랫백 익형 수치해석 결과와 실험값 비교;

(a)양력계수 (b)항력계수

Flatback 블레이드 유/무에 따른 소음 특성 변화 해석은 IEC 61400-11의 규정 위치[23]에서 수행하였다. 바람이 들어오는 방향, 풍력 발전기를 통해 직선으로 불어나가는 방향 및 좌우 60도 방향에 대해 허브 높이와 로터 반지름을 더한 길이만큼의 거리를 갖는 총 4군데의 수음자 위치에서 계산하였다[그림 3.12-13].

블레이드는 총 19개의 세그먼트로 나누어서 각각의 세그먼트에서 발생하는 소음을 모두 더해서 계산하였고 그 결과 기존의 로터와 플랫폼 익형이 적용된 로터 모두 저주파 대역에서 준분절음(quasi tonal noise)이 발생하였다. 특히 플랫폼 익형의 경우 강한 준분절음이 발생하였다.

소음 해석 결과 총 음압레벨은 플랫폼 익형이 있는 경우 Point 1: 59.65dB, 2: 56.69dB, 3: 60.52dB, 4: 56.63dB을 나타내어 플랫폼 익형이 없는 경우보다 전반적으로 소음도가 증가하였다(그림 3.14).

DU97-W-300, DU97-flatback 익형에 대한 소음도 비교 경우를 봤을 때, 15dB 이상의 차이가 났기 때문에 플랫폼 익형이 적용된 풍력발전기 로터 소음이 적용하지 않았을 경우 보다 훨씬 클 것으로 예상하였으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 풍력발전기 블레이드 인보드(inboard)에 설치된 플랫폼 구간의 상대속도와 레이놀즈수가 팁 부근에 비하여 낮아서 전체적인 소음에 대한 영향이 크지 않은 것으로 판단하였다. 즉, 플랫폼 설치 구간이 스펜방향(spanwise)으로 더 많은 구간을 차지했을 경우 강한 유입류 속도로 인하여 소음도 증가가 급격히 이루어질 것이다.

10MW 풍력발전기의 플랫폼 유/무에 따른 제원을 살펴보면, 팁부근의 익형 형상 및 구조가 거의 같다. 이로 인해 플랫폼 형상에 의해 저주파 대역에서 발생하는 소음원의 크기 변화 이외의 고주파 대역에서는 거의 유사한 값이 나왔다. 저주파 대역에서 고주파 대역으로 갈수록 난류 경계

층 뒷전 소음(turbulent boundary layer trailing edge noise)이 지배적 인데 해당 소음원의 특성을 보면 블레이드로 유입되는 유입류(inflow) 속도에 큰 영향을 받는다. 따라서, 유입류 속도가 상대적으로 큰 아웃보드 영역에 큰 영향을 받게 되는데 해당 구간의 익형 및 블레이드 형상이 비슷하여 거의 같은 소음도가 나오는 것이다.

그림(3.15-16)은 해석 1지점에서의 플랫폼 적용 블레이드와 미적용 블레이드 각각에 대해 소음원 별로 도시화 한 것이다. 플랫폼 익형이 적용되지 않았을 경우 100Hz 부근, 플랫폼 익형이 적용되었을 경우 25Hz 부근에서 발생한 최대 소음값은 두꺼운 날개 뒷전으로 인해 발생하는 블런트 뒷전 와류 흘림 소음(bluntness vortex shedding noise)임을 알 수 있다. 난류 유입 소음(turbulent ingestion noise)은 저주파 대역, 광대역 소음원인 난류 경계층 뒷전 소음(Turbulent boundary layer trailing edge noise)은 고주파 대역에서 지배적임을 확인 할 수 있다.

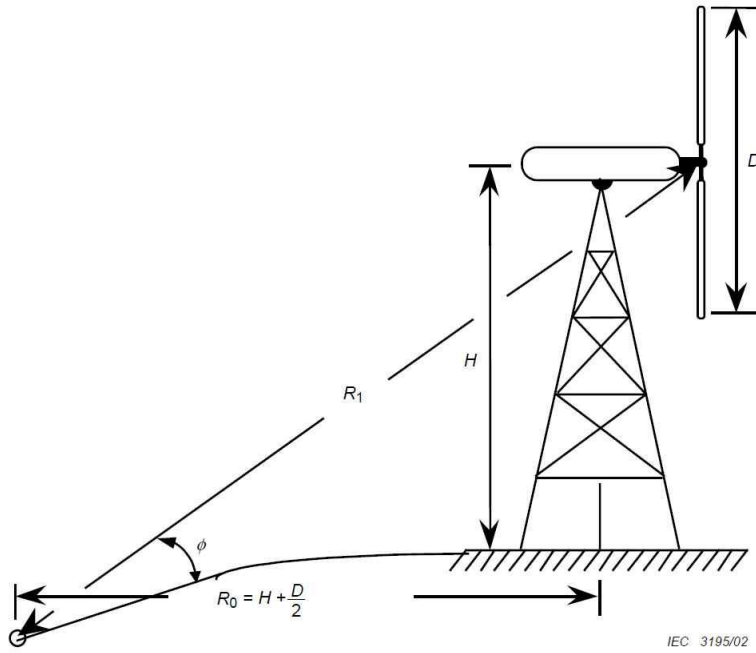


그림 3.12 IEC 61400-11 규정에 따른 소음 측정 위치
측면도

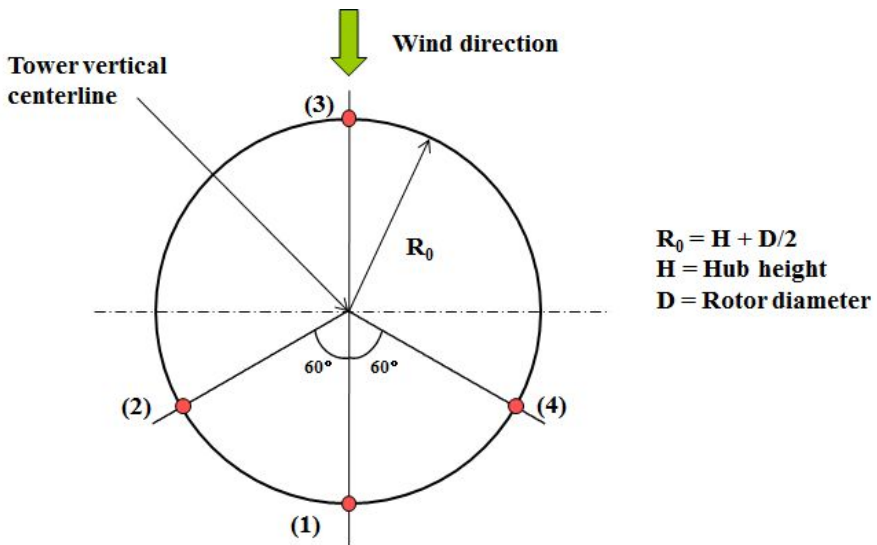


그림 3.13 IEC 61400-11 규정에 따른 소음 측정 위치 평면도

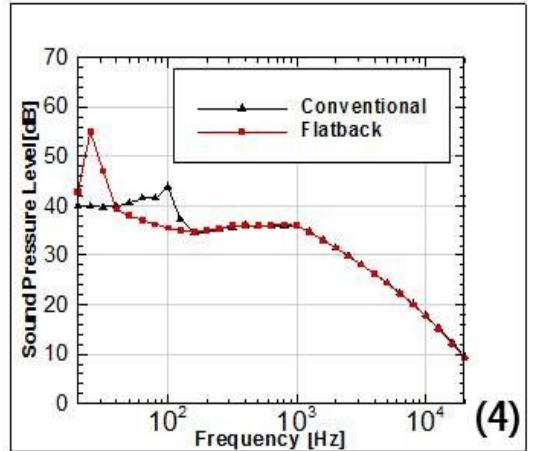
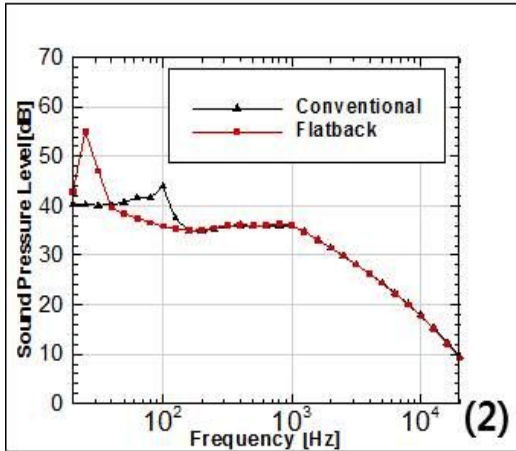
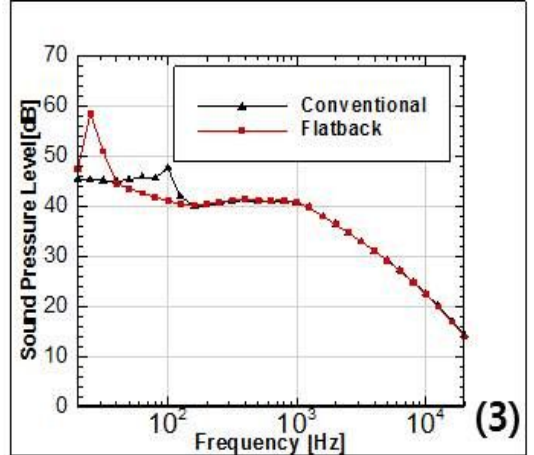
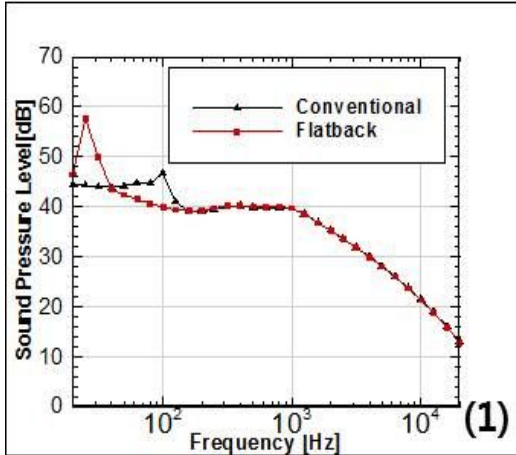


그림 3.14 IEC 61400-11 규정에 따른 4곳의 수음자 기준 위치에서의
소음 측정 결과

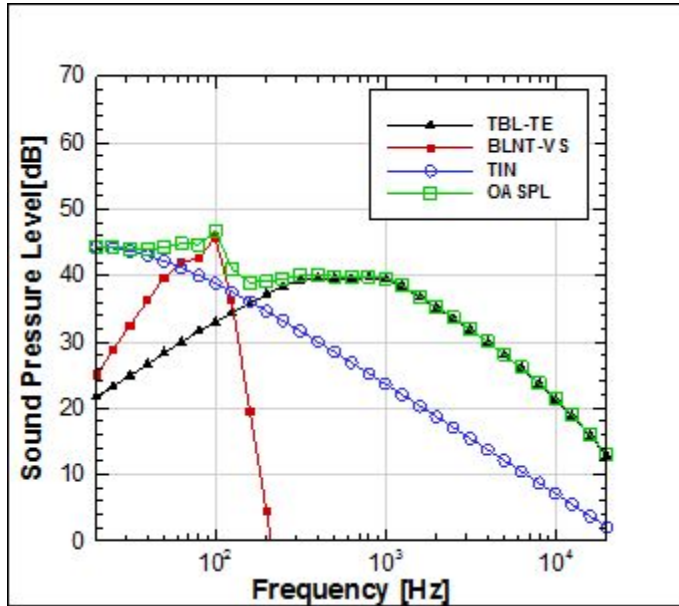


그림 3.15 해석 지점 1에서 소음원별 스펙트럼;
w/o flatback

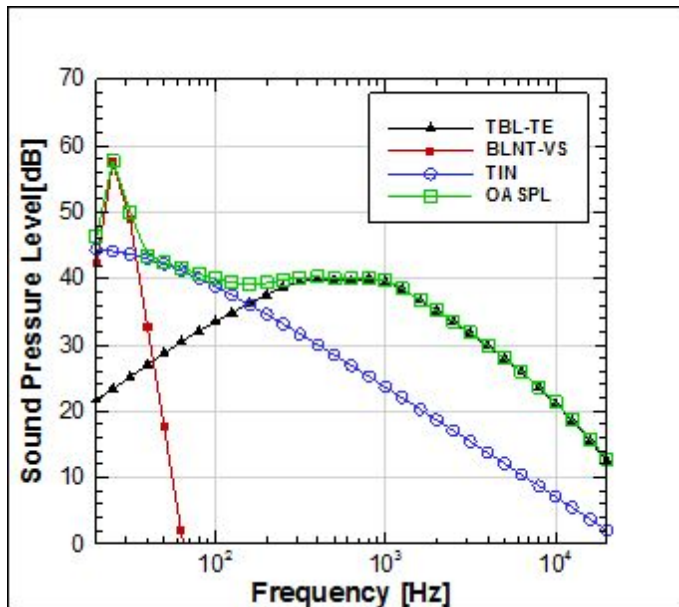


그림 3.16 해석 지점 1에서 소음원별 스펙트럼;
w/ flatback

사람의 청감 특성을 고려한 A-weighting을 적용했을 경우 총 음압레벨은 플랫백 익형이 없는 경우 Point 1: 48.03dB, 2: 44.22dB, 3: 49.08dB, 4: 44.20dB, 플랫백 익형이 있는 경우 point 1: 48.07dB, 2: 44.25dB, 3: 49.14dB, 4: 44.23dB을 나타내어 각 지점에 따라 플랫백 익형이 있는 경우가 평균 0.04dB 증가하는 결과를 보였다(그림 3.17-20). A-weighting을 하면 1kHz를 기준으로 저주파 대역으로 갈수록 보정값이 커진다. 플랫백을 적용할 경우 발생하는 준분절음은 상당히 저주파에 해당하기 때문에 보정이 많이 이루어지게 되고 결국 총 음압레벨(overall sound pressure level)은 두 경우 유사한 값이 나온다. 이러한 주파수 이동(shift) 현상은 익형 윗면과 아랫면의 평균 경계층 변위 두께 및 날개 뒷전 두께 변화로 인해 발생한 것이다. 추후에 풍력발전기 소음의 Amplitude Modulation 특성을 고려한 청감실험을 통하여 사람의 annoyance 평가가 필요할 것으로 판단된다.

그림 (3.21)은 플랫백 익형 적용 유무에 따른 소음도와 35% 플랫백 익형까지 적용한 경우에 대한 소음도를 나타낸 것이다. r은 로터 중심으로부터 반경방향 길이를 나타내며, R은 로터 반지름 길이를 나타낸다. 45% 플랫백, 40% 플랫백, 35% 플랫백 익형은 r/R 값이 약 0.263 이내로 인보드(inboard) 영역에 해당하여 아웃보드(outboard) 영역에 비해 상대적으로 낮은 유입 속도를 갖는다. 이에 따라 전체 소음도에 대한 기여도가 낮고, 결과적으로 플랫백 익형을 적용하지 않은 경우와 소음도 차이가 거의 없었다고 볼 수 있다. 플랫백 익형으로 인한 블런트 뒷전 와류 흘림 소음(trailing edge bluntness vortex shedding noise)이 30% 플랫백 적용 구간 부근에서 강하게 발생한다는 것을 알 수 있고, 결론적으로 r/R 0.263까지는 플랫백 익형을 적용하여도 전체 소음도에 영향이 없음을 확인하였다.

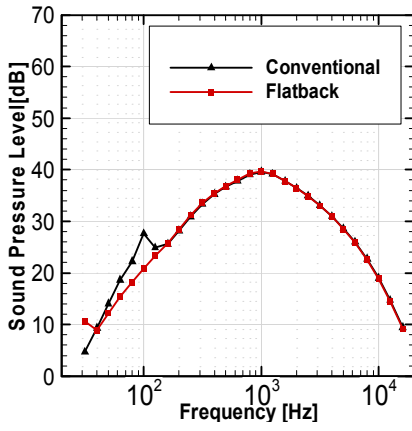


그림 3.17 A-weighting;
point (1)

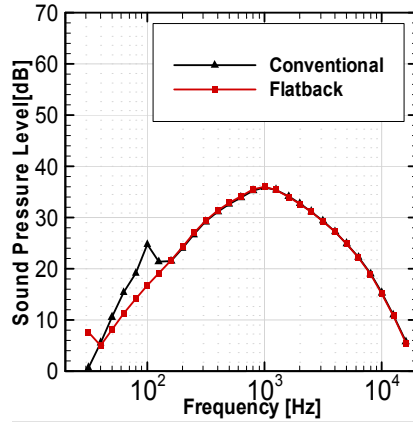


그림 3.18 A-weighting;
point (2)

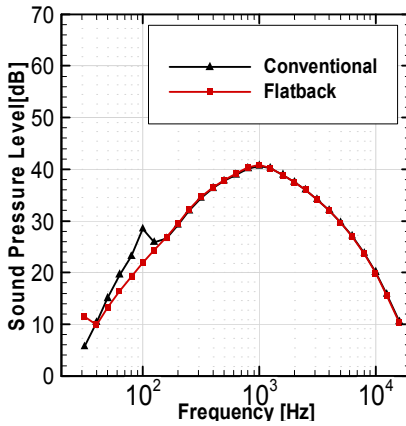


그림 3.19 A-weighting;
point (3)

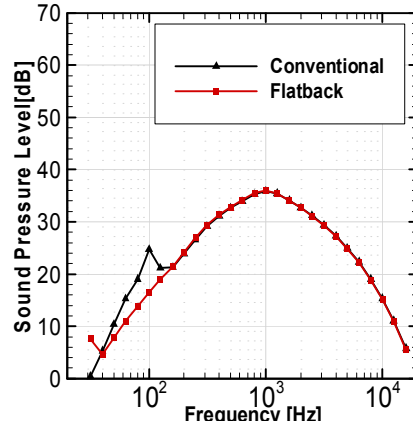
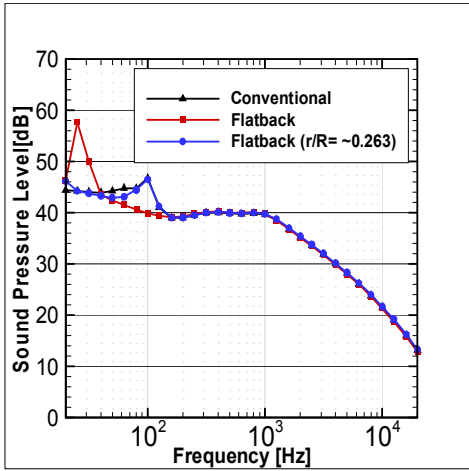
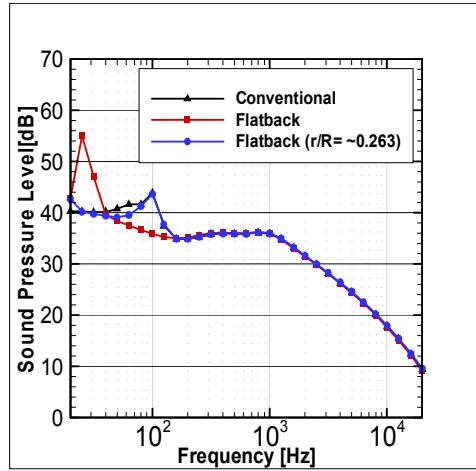


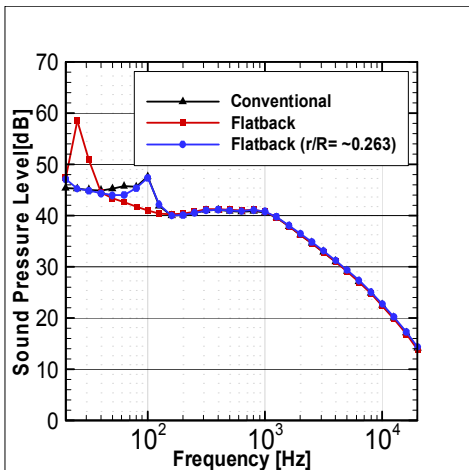
그림 3.20 A-weighting;
point (4)



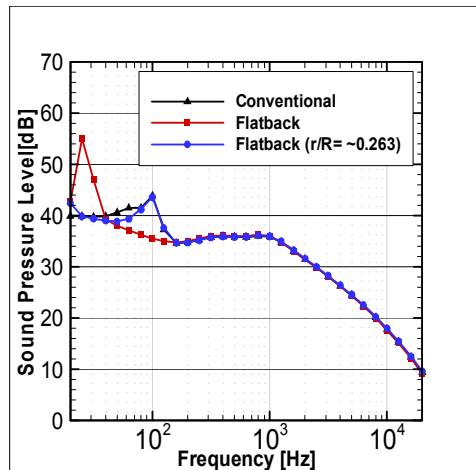
①



②



③



④

그림 3.21 IEC 61400-11 규정에 따른 4곳의 수음자 기준 위치에서 flatback 익형 적용, 미적용, $r/R=0.263$ 까지 flatback 익형 적용 시에 따른 소음 측정 결과

4. 결 론

본 연구에서는 향상된 반경험식(modified semi-empirical formula), 와류 격자 기법(vortex lattice Method) 등을 이용하여 플랫백 익형이 적용된 초대형 풍력발전기의 공력소음 특성을 예측하였다. 검증에는 美 Sandia 국립 연구소에서 개발한 BSDS 플랫백 블레이드를 이용, 美 Sandia Lab 연계 하에 Bushland, TX에서 Acoustic array 기법으로 수행한 field test 결과로 소음 검증을 진행하였다. field test의 특성을 감안하면 전반적으로 유사한 스펙트럼을 나타내었다. DU97-W-300, DU97-flatback 익형(2D)의 소음도 차이 값(15dB 이상)으로 봤을 때, 플랫백 익형 적용 유무에 따라 로터(3D) 소음도 값에 매우 큰 차이가 발생할 것으로 예상하였으나, 플랫백 익형을 블레이드 인보드(inboard) 영역에 설치하였기 때문에 출력값 뿐만 아니라 전체적인 소음도 측면에서도 예상했던 것만큼의 큰 변화는 없었다. 더욱이 A-weighting 보정을 할 경우 서로 유사한 값을 가졌다. 추가적으로, 풍력발전기 소음의 Amplitude Modulation 특성을 고려한 청감실험이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Ashwill T, Laird D. Concepts to facilitate very large blades. In: Proceedings of ASME/AIAA wind energy symposium 2007. Reno, NV.
- [2] Oertel Jr H. Wakes behind blunt bodies. *Ann Rev Fluid Mech* 1990;22:539e64.
- [3]<http://www.myfloridahomeenergy.com/help/library/energy-services/wind-energy/#sthash.PWZ16zAT.dpbs> 2016)
(Accessed 15 January 2016)
- [4] Matthew F. Barone, Dale E. Berg, William J. Devenport, Ricardo Burdisso, Aerodynamic and Aeroacoustic Tests of a Flatback Version of the DU97-W-300 Airfoil, Sandia Report2009-4185.
- [5]https://www.sharcnet.ca/Software/Ansys/16.0/en-us/help/flu_th/flu_th_sec_reynolds_averaging.html
(Accessed 7 August 2015)
- [6] Katz, J., Plotkin, A., *Low-speed aerodynamics*, Cambridge, UK; New York: Cambridge University Press; 2001.
- [7] Du, Z, Selig, M. S., A 3-D stall-delay model for horizontal axis wind turbine performance prediction, ASME Wind Energy Symposium, Reno, NV; UNITED STATES; 1998. pp. 9-19.
- [8] Kim, H., Lee, S., Son, E., Lee, S., Lee, S., Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluid -

structure interaction, *Renewable Energy* 2012; 42: 46-53.

[9] Kim, H., Lee, S., and Lee, S., “Numerical analysis on the aerodynamics of HAWTs using nonlinear vortex strength correction,” *Current Applied Physics*, Vol. 10, No. 2, 2010, pp. S311-S315.

[10] Dennis, J.E. and R.B. Schnabel, *Numerical Methods for Unconstrained Optimization and Nonlinear Equations*. 1996: SIAM.

[11] T. Brooks, D. Pope, and M. Marcolini, *Airfoil self-noise and prediction*, NASA Reference Publication 1218, NASA, 1989.

[12] M. V. Lowson, *Theory and experiment for wind turbine noise*. AIAA Paper 94-0119, AIAA, 32nd Aerospace sciences meeting and exhibit, January 10-13, 1994, Reno, Nevada, USA

[13] S. Wagner, R. Bareiß, and G. Guidati, *Wind Turbine Noise*, Springer-Verlag, Berlin, 1996.

[14] Taehyung Kim and Soogab Lee. (2014). Aeroacoustic simulations of a blunt trailing-edge wind turbine airfoil, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28(4), 1241-1249.

[15] Ffowcs Williams, J. E.; and Hall, L. H.: *Aerodynamic Sound Generation By Turbulent Flow in the Vicinity of a Scattering Half Plane*. *J. Fluid Mech.*, vol. 40, pt. 4, Mar. 1970, pp. 657-670.

[16] J. Counihan, *Adiabatic atmospheric boundary layer: a reviewed and analysis of data from the period 1880-1972*, *Atmospheric Environment* 9(10) (1975) 871-905.

[17] Derek S. Berry, *Blade System Design Studies Phase II: Final Project Report*, Sandia Report 2008-4648.

[18] <http://web.mit.edu/drela/Public/web/xfoil/>

(Accessed 3 March 2015)

[19] Taehyun Kim, A Numerical Study on Generation and Reduction of Rotating Blades Broadband Noise, June 2014, pp. 67-68.

[20] Eric Simley et al, Aeroacoustic Noise Measurements of a Wind Turbine with BSDS Blades using an Acoustic Array, 48th AIAA Aerospace science meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4-7 January 2010, Orlando, Florida.

[21] Soo-Hyun Kim, Hyung-Joon Bang, Hyung-Ki Shin and Moon-Seok Jang, Composite Structural Analysis of Flat-Back Shaped Blade for Multi-MW Class Wind Turbine, Applied Composite Materials, 2014 (21), pp. 525-539.

[22] F. R. Menter, Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for Engineering Applications, AIAA Journal 32(8) (1994) 1598-1605.

[23] Wind turbines - Part 11: Acoustic noise measurement techniques, IEC 61400-11 ED.3.

Abstract

Numerical Investigation of Aeroacoustic Characteristics of a Flatback Blade for Large-Scale Wind Turbines

Jaehyun Kim

Department of Mechanical and Aerospace Engineering
The Graduate School
Seoul National University

The present work was performed to analyze the aeroacoustic characteristics of a rotor blade with flatback airfoils for large-scale wind turbines. Modified semi-empirical model of Brooks, Pope, Marcolini and semi-empirical model of Lowson were used for the prediction of airfoil self-noise and turbulent ingestion noise. Vortex lattice method (VLM) and computational fluid dynamics (CFD) were used to predict the aerodynamic properties which are needed to calculate the noise level. BSDS(Blade System Design Study) 9-meter-long blade with flatback airfoils of the Sandia Laboratory was used to verify the aeroacoustic analysis method of wind turbine rotor. The present method is found to be adequate for predicting aerodynamic noise of wind turbine rotor. In case of a large-scale wind turbine noise prediction, the results demonstrate that bluntness vortex shedding noise of a large-scale wind turbine blade with flatback airfoil was

increased when compared with that of a conventional blade in the low frequency.

Keywords

: Flatback airfoil, Large wind turbine, Aerodynamic noise

Student Number : 2014-20677