

HAT 임펠러 설계 비교 연구

김문찬¹ · 신병철^{1,†} · 이주현² · 이신형² · 현범수³ · 남종호³

¹부산대학교 조선해양공학과

²서울대학교 조선해양공학부

³한국해양대학교 조선해양시스템공학부

Comparative Study on Horizontal Axis Turbine(HAT) Impeller Design

Moon-Chan Kim¹, Byung-Chul Shin^{1,†}, Ju-Hyun Lee², Shin-Hyung Rhee²,
Beom-Soo Hyun³ and Jong-Ho Nam³

¹Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University

²Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University

³Division of Naval Architecture & Ocean Systems Engineering, Korea Maritime University

요 약

조류발전용 HAT 임펠러 설계에 대한 성능 비교 연구를 통하여 설계 개선방향에 대하여 고찰해 보았다. 기존의 조류발전용 임펠러는 풍력에서 사용하고 있는 설계 개념을 그대로 사용하는 경향이 있으며 밀도 차이가 크고 풍력과 다른 조류발전의 특성을 고려하여 새로이 설계된 임펠러와 기존의 임펠러를 비교하였다. 향후 계산에 의한 비교 뿐 아니라 실험 그리고 경사류등과 같은 특수한 경우에 대한 검증은 수행할 계획이다.

Abstract – The present study deals with the investigation about the improvement of the design of tidal stream turbine blade (HAT) in comparison with wind turbine blade because the parameters of tidal stream turbine blade has been mostly derived from wind turbines. As such, there is plenty of room for improvement of the HAT impeller blade design. Comparisons have been done between the newly designed and existing impeller computationally. Similar comparisons will also be made for the experimental results in the near future.

Keywords: 수평축 터빈(HAT), 조류발전(Tidal stream power generation), 신재생에너지(Renewable energy), 블레이드(Blade)

1. 서 론

세계는 지금 기후변화로 상징되는 ‘환경’위기와 고유가료 대표되는 ‘자원’ 위기에 동시에 직면해 있다. 특히 기후변화 문제는 연이은 기상재해를 유발하는 것은 물론 생태계 질서를 근본적으로 뒤흔들며 인류의 생존을 위협하고 있다. 지금과 같이 ‘에너지 다 소비 체제’가 지속될 경우 지구촌이 치러야 할 기후변화에 따른 경제적 손실이 매년 세계 GDP의 5~20%에 달할 것이란 전망이 나올 정도이다(Stern Review[2007]). 이러한 기후문제 해결을 위해 세계는 자원의 효율적 · 환경 친화적 이용에 국력을 집중하고

있으며, 기후변화회의, 기후변화협약 등을 계기로 이산화탄소 절감 노력이 이루어지고 있다. 이러한 세계적 흐름에 발맞춰 우리나라도 최근 경제성장은 추구하되 화석연료 의존도를 낮추는 ‘저탄소 녹색성장(Low Carbon, Green Growth)’을 향후 60년의 새로운 국가비전으로 제시하고 정책을 추진하고 있다. 연료전지, 풍력, 바이오 에너지, 태양광, 청정연료, 조류, 조력과 같은 신재생에너지는 저탄소 녹색성장의 핵심사업으로 국가 신성장 동력 및 그린에너지 산업 발전전략의 중심사업으로 급부상하고 있다. 이중 조류발전은 무공해 에너지이며 인천, 서남해안의 조류속도가 1.5 m/s로 전 세계적으로 몇 안 되는 조류발전 최적의 환경을 갖추고 있다. 또한 다른 에너지 자원에 비해 단위 용량이 크고 발전 예측 및 연속발전이 가능한 신뢰성 있는 에너지라는 장점을 가지고 있다.

[†]Corresponding author: skysbc0618@gmail.com

조류발전은 해수의 운동에너지를 회전에너지로 변환시켜 전기를 얻는 형태이다. 조류에너지 변환장치의 축 방향에 따라 축의 방향과 해류의 방향이 수직인 Vertical Axis Turbine(VAT)방식과 축의 방향과 해류의 방향과 평행인 Horizontal Axis Turbine(HAT)방식으로 분류된다. 본 연구에서는 HAT 날개를 설계하고 성능을 분석하였다.

현재까지는 주로 선진국을 중심으로 다양한 형식의 변환장치의 연구가 활발히 이루어지고 실 해역에 설치되어 운영되고 있다. 하지만 조류발전용 터빈 날개의 개발 기간이 짧아 상당 부분이 기존의 풍력에서 사용하는 개념을 그대로 사용하고 있기 때문에 효율, 캐비테이션, 침식, 부식등과 같은 부분에서 여러 가지 개선의 여지가 많으리라 생각된다. 특히 풍력의 경우 돌풍과 같은 유체흐름이 급변하는 경우가 많아 구조강도를 높이기 위해 두꺼운 포일을 혼합하여 사용하지만, 조류의 경우 유체흐름을 예측 할 수 있기 때문에 구조강도 측면보다는 효율 측면에 주안점을 두어 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 공기에 비해 큰 밀도를 가진 해수의 특성을 고려한 조류발전용 HAT 날개의 설계 개선점을 도출하였다. 또한 이를 바탕으로 HAT 날개를 설계하여 수치해석을 통해 그 성능을 비교 검토하였다.

2. 설계 제원

2.1 해석 모델의 선정

본 연구에 사용된 기준 블레이드(CASE 1)는 조류 발전에 관한 기존의 자료를 토대로 하였으며 여러 가지 설계변수 분석을 통해 공력설계 된 블레이드의 제원은 표 1과 같고, 블레이드 형상 및

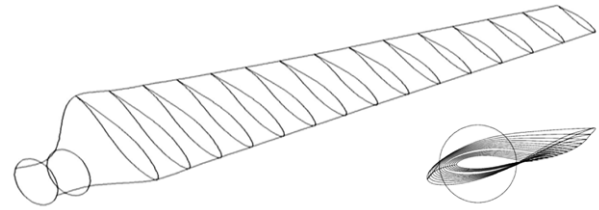


Fig. 1. 100 kw class tidal stream turbine blade(CASE 1).

foil 형상은 그림 1, 2와 같다. 허브 체결부는 원통형이며, 비틀림 축 중심은 각 단면의 leading edge로부터 25% 위치이다. 앞서 언급 하였듯이 대체적으로 풍력터빈의 날개를 기초로 하여 설계되었음을 알 수 있다.

2.2 해석 모델의 수정

기존의 블레이드는 풍력에서 사용하는 개념을 그대로 사용하였기에 여러 가지 개선의 여지를 많이 가지고 있다. 풍력발전용 블레이드의 경우 효율적인 출력특성의 확보를 위해 출력이 가장 큰 영향을 미치는 구간인 0.7~1.0R에는 NACA 5,6 series의 foil를 주로 사용하며 그 이하 구간에서는 긴 블레이드의 구조적 강도 및 안정성, 높은 받음각 등을 고려하여 두께가 두꺼운 foil를 주로 사용하게 된다(Kim *et al.* [2008]). 기존 블레이드 설계를 개선하기 위해 새로 2가지 블레이드를 설계하였다. 먼저 기존 블레이드와는 달리 0.3~1.0R까지 NACA63-418 foil를 배치 시켰다(CASE 2). 두 번째로 풍력에서는 발생하지 않는 캐비테이션 문제를 해결하기 위해 풍력 및 조류발전에서 주로 사용하는 NACA 5,6 series의 foil 대신에 캐비테이션 및 이상받음각 면에서 성능이 우수한

Table 1. Blade design parameters

Design parameters	Values
P_{rated} : Rated power	100 kw
C_p : Estimated power coefficient	0.48
η : Estimated drive train efficiency	0.9
V_{rated} : Rated stream velocity	2 m/s
ρ : Sea water density	1024 kg/m ³
λ : Tip speed ratio	5.1773
D: Diameter	8 m
N: Blade number	3
ω : Rotational speed	24.72 rpm

section	Chord(mm)	Twist angle(deg)	foil type
0.00	-	-	
0.05	-	-	
0.10	-	-	
0.15	300	-	Cylinder
0.20	300	-	Cylinder
0.25	transition	transition	transition
0.30	684.11	16.98	DU-93-W-210
0.35	655.11	14.59	DU-93-W-210
0.40	626.11	12.66	DU-93-W-210
0.45	597.1	11.07	DU-93-W-210
0.50	568.1	9.75	DU-93-W-210
0.55	539.1	8.64	DU-93-W-210
0.60	510.09	7.69	DU-93-W-210
0.65	481.09	6.87	DU-93-W-210
0.70	452.09	6.15	DU-93-W-210
0.75	423.08	5.50	NACA63418
0.80	394.08	4.91	NACA63418
0.85	365.08	4.33	NACA63418
0.90	336.08	3.74	NACA63418
0.95	307.07	3.02	NACA63418
1.00	278.07	2.50	NACA63418

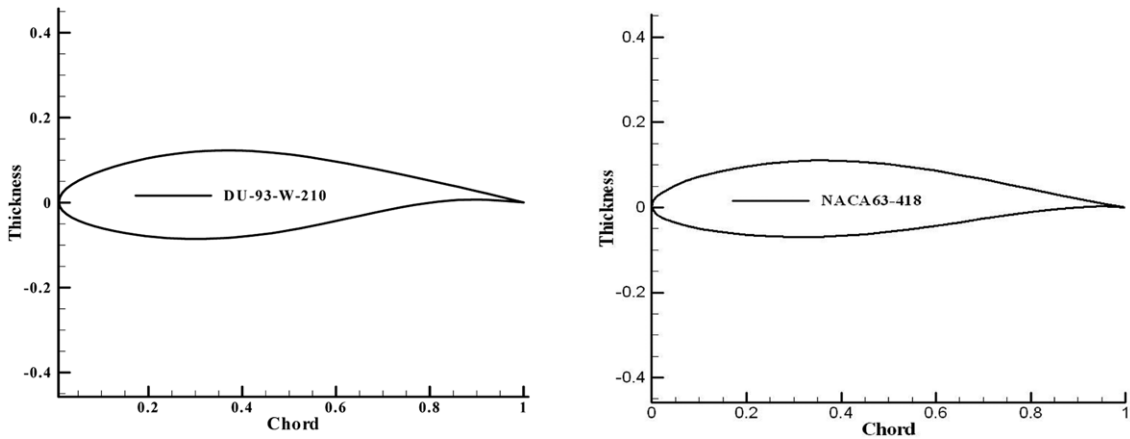


Fig. 2. DU-93-W-210, NACA63-418 blade section.

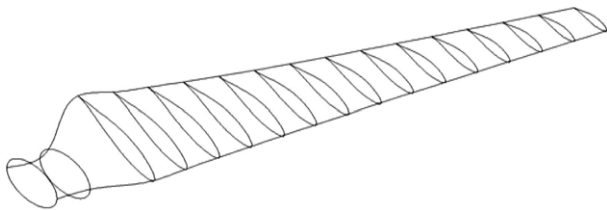


Fig. 3. Modified tidal stream turbine blade(CASE 2).

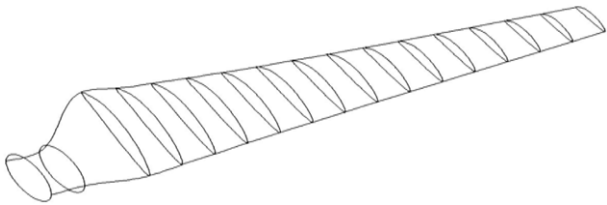


Fig. 4. Modified tidal stream turbine blade(CASE 3).

상선용 프로펠러에서 널리 사용되어지는 NACA thickness66 A=0.8 meanline 단면을 사용하였고, 스펠방향 r/R 에 따른 코드 길이를 CASE 2와 동일하게 만들어 0.3~1.0R까지 배치 시켰다(CASE 3). 풍력발전용 블레이드의 경우 갑작스러운 돌풍과 같이 방향을 예측하기 어려운 경우가 많기 때문에 허브 체결부를 실린더 형상을 사용한다. 하지만 조류발전의 가장 큰 장점중 하나가 급격한 방향 전환이 없는 즉, 흐름을 어느 정도 예측 가능하다는 것이기 때문에 좀 더 효율적인 출력을 위해 장축:단축의 비가 2:1인 타원을 사용하였다. CASE 2, 3의 형상은 그림 3, 4와 같다.

3. 수치해석

3.1 해석 유동장의 재원

수치해석에 사용된 해석 유동장은 그림 5와 같다. 회전하는 로터를 해석하기 위하여 MRF(Moving reference frame) 방법을 사용하였으며, 3개의 날개를 가지는 터빈을 해석하기 위해 120도에 해당하는 도메인을 구성하였다. 터빈의 지름을 기준으로 길이방향으로 앞쪽으로 3배, 뒤쪽으로 6배의 공간을 주었고, 폭 방향으로 3배의 공간을 주었다.

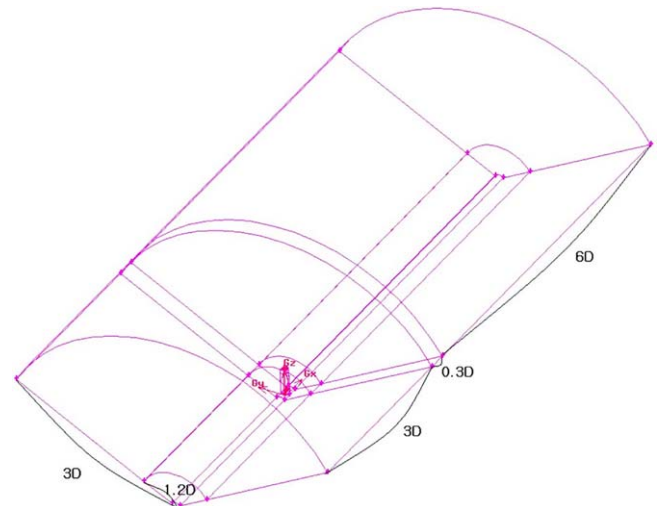


Fig. 5. Computational domain.

3.2 수치해석

유동장의 해석을 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT를 사용하였다. 셀 중심 유한체적기법(cell-centered finite volume method) 기반의 RANS(Reynolds-averaged Navier-Stokes)방정식을 사용하였고, 터빈의 회전을 위해서 MRF 방법을 사용하였다. 압력과 속도의 연계는 Weiss and Smith가 제안한 방법으로 연속방정식과 운동량 보존 방정식을 하나의 방정식으로 한 번에 푸는 방법을 사용하였다(Weiss *et al.* [1995]). 대류항의 이산화는 Second order upwind을 사용하였다. 점성모델은 realizable k-ε모델이 사용되었다(shih *et al.* [1995]). No-slip 조건이 적용되는 벽면 근처에서는 Kim and Choudhury가 제안한 non-equilibrium wall function을 사용하였다(Kim *et al.*[1995]).

3.3 경계조건

경계조건은 그림 6과 같다. 해석유동장의 앞쪽 면은 조류가 일정 유속을 가지고 유입되는 경계조건(Velocity inlet)을 사용하였고, 뒤쪽 면은 출구 경계면으로 일정압력 조건이 경계조건(Pressure

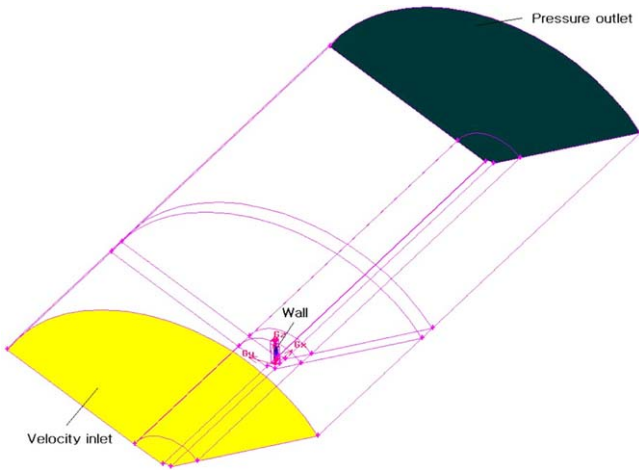


Fig. 6. Boundary conditions.

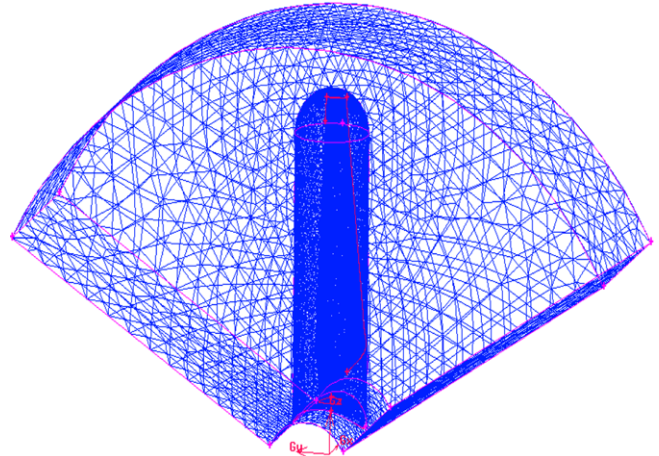


Fig. 8. Mesh around the blade.

outlet)을 주었다. 터빈의 날개에서는 벽면 경계조건(no-slip condition)을 주었다. 전체 유동장은 일정한 각속도(24.72RPM)를 가지며 회전한다. 터빈 주위의 블록은 비구조 격자를 사용하였고, 나머지 부분은 구조 격자를 사용하였다. 따라서 그림에 표시된 경계면에서 계산 값을 연결해 주기 위해 보간법을 사용하였으며 Interface조건을 사용하였다.

3.4 격자계

로터의 복잡한 형상을 모델링하기 위하여, 로터주위에는 비구조 격자를 사용하였다. 나머지 부분에서는 필요한 격자의 수를 줄이고, 계산의 정도를 높이기 위하여 구조 격자가 사용되어 다중블록 혼합 격자계(hybrid mesh)로 구성하였다. 셀의 총 개수는 1,570,931개이다. 그림 7은 전체 계산격자를 보여준다. 그림 8은 터빈 날개 주위의 비구조 격자 블록을 보여주고 있다. 비구조 격자 블록은 2개의 블록으로 이루어져 있어, 다른 날개에 대한 해석을 할 때는 실린더 모양의 날개와 가까운 블록에 대해서만 격자를 새로 생성하여 해석을 수행 하였다.

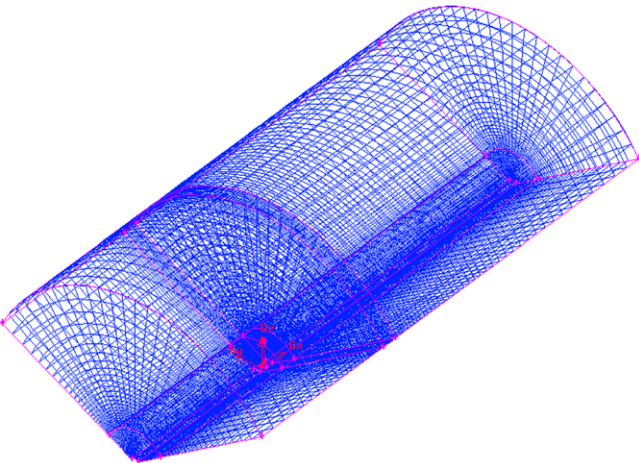


Fig. 7. View of the mesh.

4. 해석결과

4.1 기준 블레이드 계산결과

기준 블레이드(CASE 1)에 대한 성능해석을 수행하였으며, 토크와 동력 계수를 통해 로터의 성능을 분석해보았다. 동력계수는 로터의 에너지 변환율을 나타내는 상수로 로터의 효율과 성능을 평가 할 수 있으며 식 (1)과 같고, 토크계수는 동일한 유속에서 로터의 회전능력을 나타내며 식 (2)와 같다. 유속은 1 m/s에서 4 m/s 까지 0.2 m/s 간격으로 증가 시켰으며, 이에 따른 토크와 효율 및 발전량은 표 2와 같다. 설계속도 2 m/s에서의 동력계수는 0.4668 이며 설계 발전량인 100 kw보다 조금 적은 96.1 kw가 나왔다. 그림 9, 10에서 식 (3)과 같이 주변 유속에 대한 블레이드 날개끝의 최대 접선속도의 비를 나타내는 날개끝 속도비(Tip Speed Ratio, TSR)에 따른 토크계수(C_T)와 동력계수(C_P)의 결과를 선행연구와 비교해 보았다. 선행연구는 유동장의 해석을 위해 CFX를 사용하였으며, 블레이드 성능평가를 위해 BEMT(Blade Element Momentum Theory) 이론을 적용하였다. 계산결과, 선행연구와의 정량적인 면에서 약간의 차이가 있으나 정성적인 면에서 유사함을 알 수 있다.

$$C_p = \frac{T\omega}{0.5\rho U^3 A} \tag{1}$$

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho U^2 AR} \tag{2}$$

$$TSR = \frac{R\omega}{U}$$

- T: Torque
- ω : Rotational Speed
- ρ : Density
- U: Stream Velocity
- A: Rotor Disc Area
- R: Blade Radiue

Table 2. Results of numerical analysis

Stream Velocity [m/s]	Tip Speed Ratio [TSR]	Power Coefficient [C_p]	Torque Coefficient [C_T]	Rated Power [kw]
4	2.5886	0.3413	0.1317	562.155
3.8	2.7249	0.3584	0.1314	506.119
3.6	2.8763	0.3735	0.1297	448.434
3.4	3.0454	0.3880	0.1273	392.481
3.2	3.2358	0.4019	0.1241	338.951
3	3.4515	0.4147	0.1201	288.164
2.8	3.6980	0.4280	0.1157	241.823
2.6	3.9825	0.4421	0.1109	199.995
2.4	4.3144	0.4549	0.1054	161.847
2.2	4.7066	0.4642	0.0986	127.210
2	5.1773	0.4668	0.0901	96.104
1.8	5.7525	0.4663	0.0810	69.994
1.6	6.4716	0.4545	0.0702	47.911
1.4	7.3961	0.4261	0.0576	30.094
1.2	8.6288	0.3629	0.0420	16.139
1	10.354	0.2297	0.0222	5.911

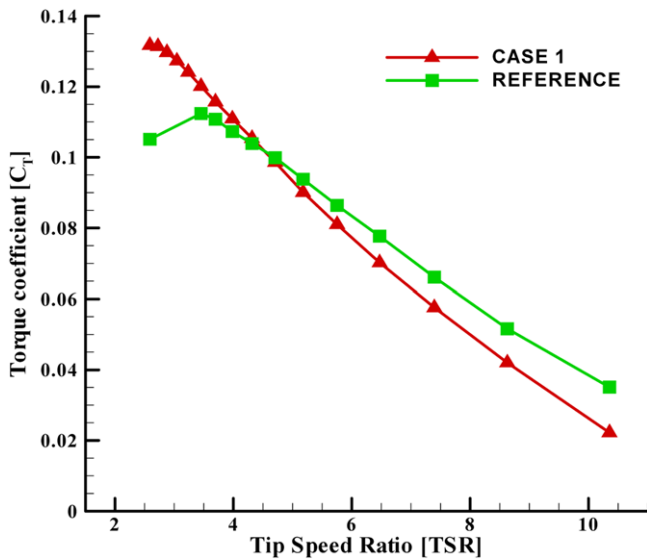


Fig. 9. Torque coefficient vs TSR.

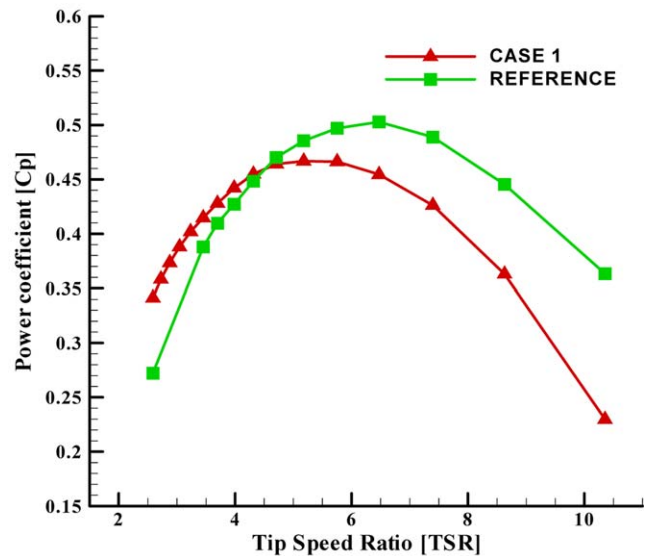


Fig. 10. Power coefficient vs TSR.

4.2 설계 블레이드 계산결과

기준 블레이드(CASE 1)의 단면을 새로 설계한 블레이드(CASE 2, 3)에 대한 성능해석을 수행하였다. 수치해석 조건은 CASE 1과 동일하게 유속은 1 m/s에서 4 m/s까지 0.2 m/s 간격으로 증가시켰으며, 이에 따른 토크와 효율 및 발전량을 알아보았다. 그림 11, 12는 각 블레이드의 날개끝 속도비(TSR)에 따른 토크 및 효율계수를 비교한 그래프이며, 설계속도 2 m/s(TSR: 5.1773)에서의 결과 값을 표 3에서 비교하여 보여주고 있다. CASE 2의 경우 CASE 1과 정성적인 면과 정량적인 면에서 거의 일치하는 경향을 보였다. 하지만 정격유속이 되기 전의 느린 유속에서 전체적으로 CASE 1보다 높은 동력계수를 보이고 있으며 설계속도인 2 m/s에서도 약

Table 3. Comparison of results at design velocity (TSR: 5.1773)

	Power Coefficient [C_p]	Torque Coefficient [C_T]	Rated Power [kw]
CASE 1	0.4668	0.0901	96.104
CASE 2	0.4677	0.0903	96.303
CASE 3	0.4822	0.0931	99.272

간 높은 효율을 보이고 있다. 이는 허브 체결부의 형상을 실린더가 아닌 타원을 사용하고, 단면을 NACA63-418 단면으로 배치함으로써 CASE 1에 비해 효율 면에서 증가한 것으로 보인다. 그림 13에서 볼 수 있듯 허브 체결부가 원일 경우 유체가 원 뒤쪽에서 매끄럽게 빠져나가지 못하는 것을 볼 수 있다. CASE 3의 경우 빠

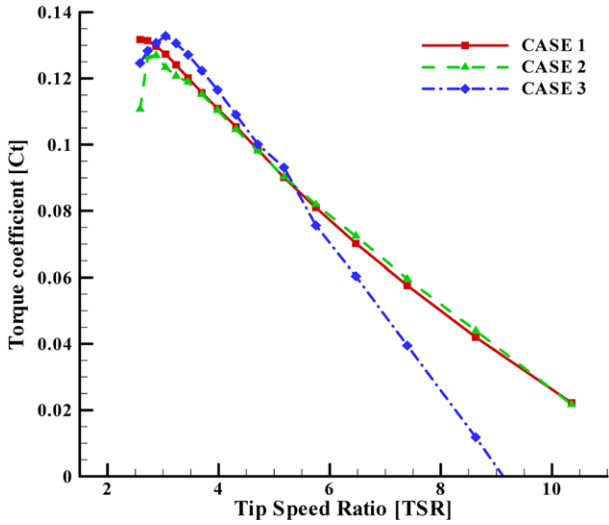


Fig. 11. Comparison of torque coefficient.

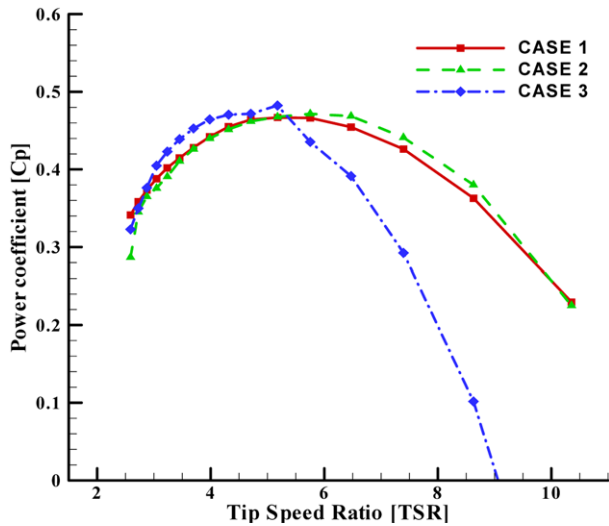


Fig. 12. Comparison of Power coefficient.

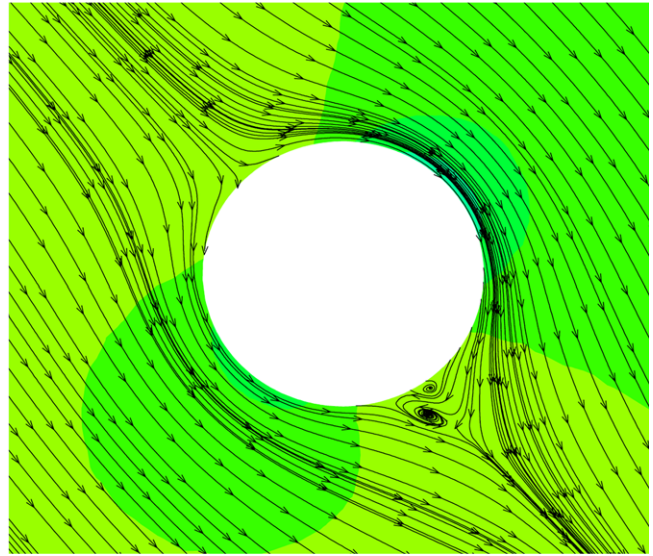
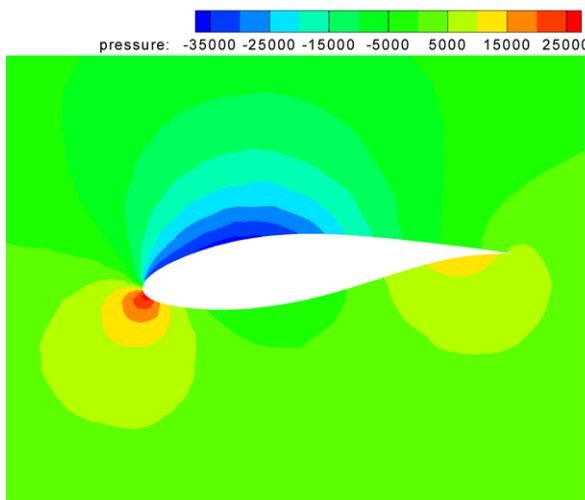
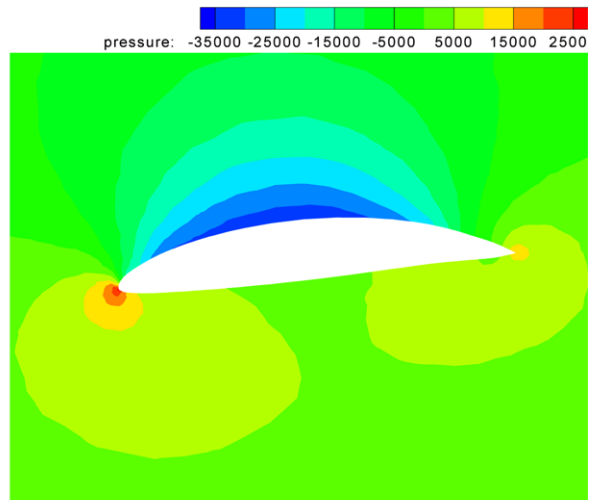


Fig. 13. Stream lines around cylinder.

른 유속에서 CASE 1, 2에 비해 높은 효율을 보였으나 설계속도 이하의 영역에서 CASE 1, 2에 비해 현저히 낮은 효율을 보였다. 하지만 날개 단면 주위의 압력분포를 보면 CASE 1, 2에 비해 압력분포가 한 곳에 국부적으로 집중되어 있지 않고 넓은 지역에 분포되어 있는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 캐비테이션 측면에서는 CASE 3이 CASE 1에 비해 유리한 것을 확인 할 수 있다. 그림 14는 0.70R 단면 주위의 압력분포이며 그림 15는 블레이드 표면의 압력분포와 국부적인 압력 강하로 인한 캐비테이션 발생 가능 영역을 보여준다.



(a) CASE 1 blade



(b) CASE 3 blade

Fig. 14. Pressure distribution of blade at 0.7r/R.

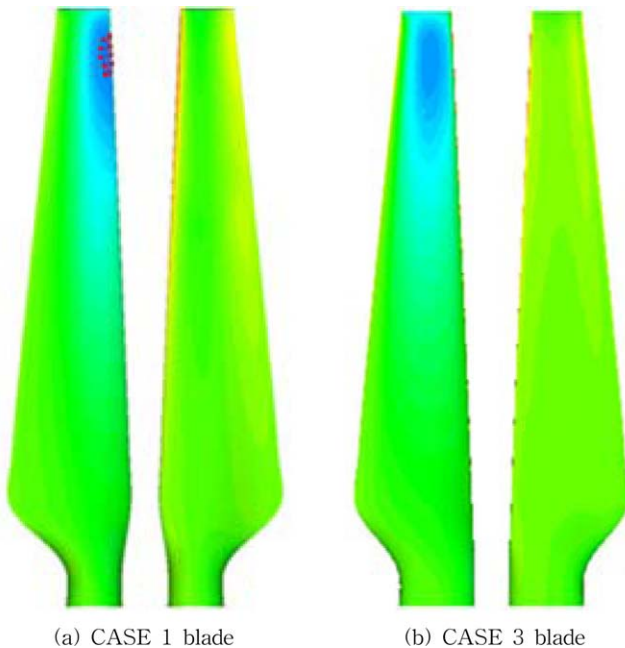


Fig. 15. Pressure distribution.

5. 결 론

풍력에서 사용하는 개념을 그대로 사용하고 있는 조류발전용 블레이드를 조류의 특성에 맞게 변형시켜 그 성능을 확인하여 보았으며 이를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 풍력에서 사용하는 여러가지 단면이 혼합된 형태의 블레이드보다 효율 면에서 좋은 NACA 6 series의 단면을 단독으로 사용할 경우 효율이 더 좋았다.

- 선박용 프로펠러가 입사각이 작은 상태에서 통상 운항되는 것에서 알 수 있듯이 TRS이 작은 영역(유속이 빠른 영역)에서 선박용 프로펠러에 주로 사용하는 단면을 적용한 블레이드의 효율이 좋았으며 캐비테이션 측면에서도 우수하였다.

- 조류발전의 경우 흐름을 대략적으로 예측할 수 있다는 장점이 있으므로 허브 체결부의 형상을 원이 아닌 타원으로 하는 것이 효율적이다.

- 향후 정상류가 아닌 경사류 등에 의한 블레이드의 효율 및 강도 해석이 요구되며, 정도 높은 효율 검증을 위해 모형실험을 수행할 예정이다.

후 기

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(과제 번호 : 20093021070010 및 20093020070020)으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] Nicholas Stern, 2007, "The Stern Review", The Economics of Climate Change, Cambridge University Press.
- [2] 김범석, 김만웅, 이영호, 2008, "1 MW 풍력터빈 블레이드 형상기본설계 및 성능해석", 유체기계저널: 제11권, 제5호, pp.15-21.
- [3] Weiss, J. and Smith, W., 1995, "Preconditioning Applied to Variable and Constant Density Flows", AIAA Journal, 33(11): 2050-2057.
- [4] Shih, T.H., Liou, W.W., A. Shabbir, Z.G. Yang, and Zhu, J., 1995, "A new kappa-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds-number turbulent flows", Comput. Fluids 24: 227-238.
- [5] Kim, S.E. and Choudhury, D., 1995, "A Near-Wall Treatment Using Wall Functions Sensitized to Pressure Gradient", In ASME FED Vol. 217, Separated and Complex Flows. ASME.

2010년 3월 30일 원고접수

2010년 5월 3일 심사완료

2010년 5월 19일 수정본 채택