

EDISON CFD를 이용한 100 kW 수평축 조류발전 터빈 주위 유동 해석

오 승 진^{1*}, 남 권 우¹

¹서울대학교 조선해양공학과

본 연구는 조류발전 터빈의 블레이드 형상 최적화 해석 시스템 개발에 대한 사전연구의 일환으로 EDISON CFD의 프로펠러 단독성능 S/W와 SNUFOAM ShipMesh Advanced 자동격자생성기를 이용하여 조류발전 터빈 주위 유동장에 대한 수치해석을 수행하였다. TSR 조건 변화에 따라 수치해석을 수행하고 이에 대한 power, total coefficient를 동일한 조건에서 수행된 실험결과와 비교 검증하여 해석자의 신뢰도를 확인하였다. 또한 블레이드 전체를 모델링한 full body 해석과 하나의 블레이드만을 모델링한 single body 해석 결과를 비교하여 경제적이면서 정도 높은 터빈 성능해석 프로세스를 제안하였다. 조류발전 터빈의 TSR 조건 변화에 따라 낮은 TSR 조건에서는 국부적 와동발생에 의해 C_p 가 감소하는 것을 확인하였고 설계 TSR에서 가장 좋은 효율을 보임을 확인하였다. 이를 통해 suction side의 압력 분포, 팁 와동의 강도 등 성능개선을 위한 주요한 설계변수를 식별하였다.

Key Words : 전산유체역학(CFD), SNUFOAM, 조류발전 터빈(Current Turbine), TSR (Tip Speed Ratio), C_p (Power Coefficient), C_T (Total Coefficient), MRF (Moving Reference Frame)

1. 서 론

온실가스의 배출에 대한 규제를 통해 지구 온난화 현상의 방지를 위한 교도의정서가 발효됨에 따라 전 세계적으로 친환경 에너지 문제에 대한 개발과 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 대표적인 친환경 발전 시스템 중 조류, 풍력, 태양열 등을 이용한 발전 시스템들이 존재한다. 풍력, 태양열 발전 시스템의 경우 날씨의 영향을 크게 받기 때문에 발전량의 예측이 까다로운 단점이 있지만, 조류발전의 경우 조수간만의 차이를 이용하기 때문에 대상에너지원(조류)의 흐름이 안정적이고 발전량의 예측이 가능한 신뢰성 있는 에너지원이다. 또한, 조류발전 시스템을 풍력발전 시스템과 비교해 보았을 때 공기의 밀도보다 해수의 밀도가 약 830배 정도 크고, 유체 운동에너지의 밀도도 더 높기 때문에 터빈의 크기를 더 작게 설계하더라도 비슷한 수준의 발전 성능을 나타낼 수 있다.

그러나 조류발전 터빈의 경우 적용 가능한 지역이 제한적이며 특수한 설치기술이 요구됨에 따라 풍력발전에 비해 연구수준이 덜 발달하였다. 따라서 조류발전 터빈의 설계에 있어서 성능 개선 여지가 크다고 할 수 있다.

이와 같은 이유로 많은 연구들이 진행되고 있는데, 그 중 Bahaj et al., 2007 [1]은 조류발전 터빈에 대해 예인수조와 캐비테이션 터널에서 여러 작동/설계 조건에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Lee, 2011 [2]은 CFD 기법을 이용하여 TSR 조건에 따른 조류발전 터빈의 성능변화에 대한 연구를 수행하였고, raked-tip 적용을 통한 저소음 조류발전 터빈의 설계를

제안했다. Park, 2013 [3]은 유체구조연성 기법을 적용한 CFD 프로그램을 이용하여 비설계조건에서의 조류발전 터빈의 성능 해석을 수행하였다.

이전 연구들에서는 CFD를 이용한 조류발전 터빈 성능 해석이 충분한 신뢰도를 가짐을 보였다. 하지만 다양한 설계 인자들에 대해 성능 지표의 변화에 대한 연구가 체계적으로 이루어지지 못하였다. 따라서 CFD 해석 기법과 블레이드 설계 최적화를 통합한 해석시스템을 개발할 필요가 있다.

본 연구에서는 조류발전 터빈의 블레이드 형상 최적화 연구의 일환으로 EDISON CFD의 프로펠러 단독성능 해석 S/W를 이용하여 조류발전 터빈 주위 유동장을 해석하고, 이를 실험적 연구와 비교 검증하였다. 표면압력 및 주위 유동장 성분을 설계 변수로 제공하여 조류발전 터빈의 블레이드 형상 최적화 프로그램과의 연계를 고려하도록 하였다.

2. 본 론

2.1 문제 정의

해석대상은 Fig. 1과 같이 Lee, 2011 [2]에서 사용되었던 모델과 동일한 100 kW급 조류발전 터빈으로 블레이드의 단면 형상은 NACA63418으로 구성되어 있으며 모형터빈의 직경은 0.4 m이다. 이는 실 모델 대비 1:20의 축척비를 가진다.

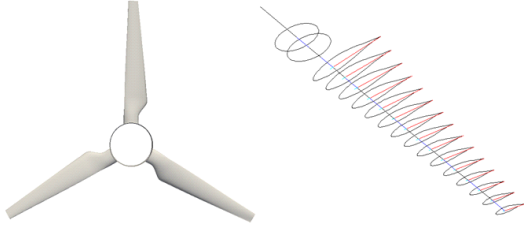


Fig. 1 Geometry and cross section of current turbine

본 연구에서는 Table 1과 같이 식 (1)과 같이 TSR (tip speed ratio) 조건을 변화시켜가며 유동 조건을 적용하였다. 이때 사용된 변수 들 중 ω 는 turbine speed ratio (rad/s), R 은 turbine radius (m), v 는 flow velocity (m/s)를 의미한다.

$$\lambda(TSR) = \frac{\omega R}{v} \quad (1)$$

Re 수 변화에 따른 영향을 최소화하기 위해 블레이드 반경 70% 지점에 대한 코드 길이를 특성 길이로 하는 Re 수를 비슷한 수준에서 유지하게끔 실험케이스를 선정하였으며 터빈의 회전속도 n 은 25 rad/s로 고정하고 유체의 속도 V_A 를 변화시켜가며 TSR 조건을 변화도록 하였다.

Table 1 Overview of implemented cases

TSR	RPS	V_A	Re (10^4)
3.3	4	1.527	3.62
3.5	4	1.436	3.60
4	4	1.257	3.58

수치해석결과는 동일조건에서 수행된 Park, 2014 [4]의 실험결과 비교하여 그 타당성을 검증하고자 하였다. 또한, single blade에 periodic 경계조건을 적용한 해석결과와 full body 해석 결과를 비교하여 적용된 경계조건의 타당성을 검증하였다.

2.2 수치해석 기법

본 연구에서는 경제적인 터빈성능해석을 위해 MRF (moving reference frame)기법을 적용한 EDISON CFD의 프로펠러 단독성능 해석 S/W를 해석자로 선정하였다. 해석자의 지배방정식은 식 (2)-(3)과 같다.

$$\nabla \cdot (\vec{u}_R \otimes \vec{u}_I) + \vec{\Omega} \otimes \vec{u}_I = -\nabla(p/\rho) + \nu \nabla \cdot \nabla(\vec{u}_I) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{u}_R = 0 \quad (3)$$

Navier-Stokes 방정식에 Coriolis force가 추가되었으며 유동장의 flux는 상대속도 \vec{u}_R 에 의해 계산되었으며 reference frame의 회전에 대응되는 flux를 전체 유동장에 적용하였다. 사용된 수치기법으로는 시간차분은 정상상태, 공간차분에는 2nd order scheme을 사용하였고, 압력-속도 연성에는 PIMPLE algorithm, 난류 모델에는 $k-\omega$ SST 모델을 사용하였다.

먼저 full body에 대한 해석 영역은 Fig. 2와 같다. inlet에는 Dirichlet 경계조건, outlet에는 Neumann 경계조건을 적용하였다. 블레이드 주변에서는 비정합경계면을 이용한 interface 경계조건을 적용하였고 블레이드 표면에는 no-slip 경계조건을 적용하였으며 innerWall과 outerWall에는 각각 slip 조건을 적용하였다.

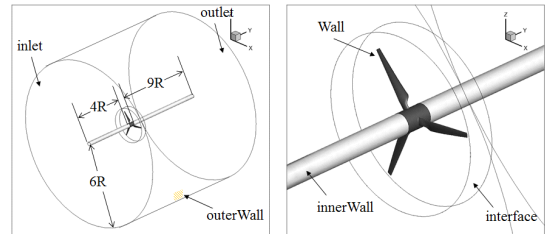


Fig. 2 Domain size and boundary condition (Full body)

Single body에 대한 해석 영역은 Fig. 3과 같다. 전체 3개의 블레이드 중 1개의 블레이드만 사용했으므로 120도의 중심각을 가지는 부채꼴 모양 계산영역을 만들고 이에 cyclic interface를 적용하여 반복되는 계산영역을 생략하였다. 다른 경계면에서의 경계조건은 full body와 동일하다.

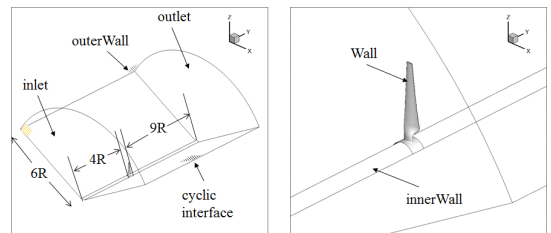


Fig. 3 Domain size and boundary condition (Single body)

격자 생성 툴은 EDISON CFD의 SNUFOAM ShipMesh Advanced 자동격자생성기를 사용하여 육면체 기반의 격자를 생성하였다. Fig. 4와 같이 터빈의 날카로운 trailing edge 부분을 구현하기 위해 각각의 터빈 surface를 분할하고 split - rename - merge 과정을 거쳐 surface feature를 개선하였다.

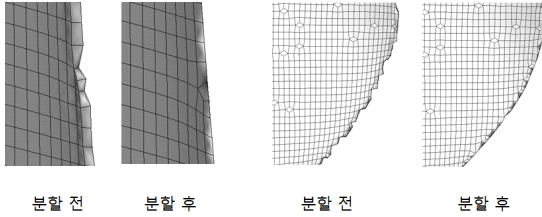


Fig. 4 Mesh improvement

또한 격자는 Table 2와 같이 full body와 single body에 대해 각각 생성하였으며 single body에 대해서는 grid dependency 수행을 통해 수치해석 결과의 타당성을 확인하고자 하였다.

Table 2 Mesh resolution and number of cells

Approach	Resolution	Cells
Single body	Coarse	646,860
	Medium	1,206,593
	Fine	2,397,948
Full body	Medium	3,608,424

이를 통해 복잡한 터빈형상 주위의 격자를 비교적 손쉽게 생성하였고 터빈 주위에서 조밀하게, 터빈에서 멀어질수록 성기게 하여 경제적인 해석을 수행할 수 있었다.

또한, 얻어진 토크(Q)와 항력(T)은 각각 식(4), (5)와 같이 무차원화 하여 C_p (Power coefficient)와 C_T (Total coefficient)로 나타냈다. 이때 w 는 각속도, S는 유입류가 입사하는 면적을 나타낸다.

$$C_p = \frac{Qw}{0.5\rho V_A^3 S} \quad (4)$$

$$C_T = \frac{T}{0.5\rho V_A^2 S} \quad (5)$$

2.2 해석 결과

Fig. 5는 single body해석에 대한 grid dependency test 결과를 나타낸다. TSR=3 조건에서 세 가지 격자에 대해 해석을 수행하였다. 세 가지 해석 결과 모두 토크계수에 대해 실험값 대비 8% 이내의 오차를 보여 합리적인 결과를 도출하였음을 알 수 있었다. 또한, 각 계산 결과의 차이는 2% 이내로 해석 결과의 큰 차이가 없음을 확인하였다. 이 결과를 토대로 최종 해석은 medium grid를 기준으로 수행하였다.

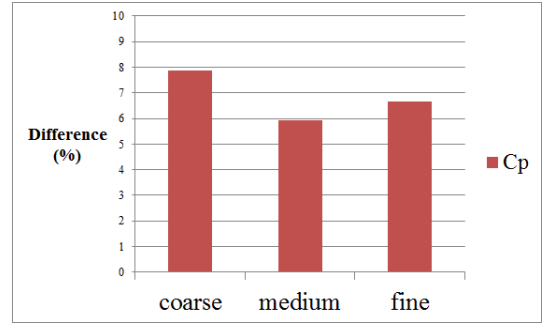


Fig. 5 Error comparison of single body to the number of cells

Fig. 6는 C_p 에 대한 실험결과와 수치해석 결과와의 비교이다. 설계 TSR 조건인 TSR=3.5에서 가장 높은 C_p 를 보였다. 이는 실험과 CFD 모두 같은 경향을 나타냄을 확인하였다. TSR=3.3 조건에서 특히 C_p 값이 크게 감소하게 되는데 이는 TSR=3.3 조건이 설계영역 밖이어서 큰 받음각과 국부적 유동 박리가 발생하게 되며 이와 같은 물리적 현상이 C_p 의 감소를 발생시키는 것으로 예상된다. 또한 full body와 single body 해석 결과를 각각 비교해 보았을 때 해석 결과의 차이는 큰 차이를 보이지 않았으며 오차율의 절대 값은 TSR=3.3 조건에서 최대 8%까지 상승하였다.

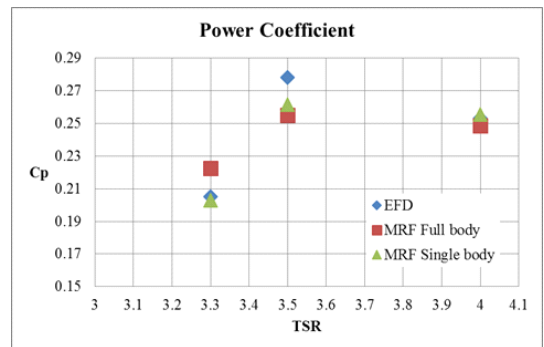


Fig. 6 Comparison of power coefficient

Fig. 7은 TSR조건에 따른 streamline와 압력계수의 비교 그림이다. TSR=4.0에서의 압력면의 압력이 크게 증가하지만 C_p 값은 TSR=3.5보다 낮은 결과를 보인다. 이를 통해 C_p 가 터빈 블레이드 양면에 작용하는 압력 차이에 큰 영향을 받을 수 있다. 또한 유선분포를 통해 TSR 조건이 낮아질수록 유동박리 현상이 크게 발생할 수 있다.

Fig. 8은 suction side에서의 압력분포를 나타내었다. 앞서

언급하였듯이 TSR=4.0 조건에서는 suction side의 압력이 크게 나타난다. 이를 통해 TSR=4.0에서의 C_p 가 TSR=3.5보다 작은 원인에 대한 설명이 가능하다. 또한, 설계 TSR=3.5에서 가장 낮은 suction side 압력분포를 보인다. 이를 통해 suction side의 압력분포가 주요한 설계변수로 사용할 수 있음을 확인하였다.

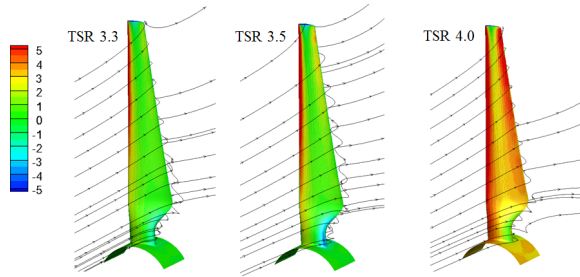


Fig. 7 Comparison of streamline and pressure coefficient

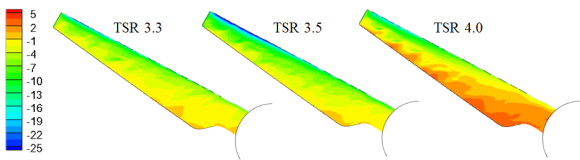


Fig. 8 Comparison of pressure coefficient (suction side)

Fig. 9는 vorticity magnitude 50에 대한 isosurface를 나타낸다. 특히 TSR=3.3 조건에서 trailing edge를 따르는 국부 유동이 크게 발생함을 알 수 있고 이를 통해 더 낮은 TSR 조건에서는 유동 박리가 심해져 실속이 발생하고 효율이 급감할 것으로 예상된다.

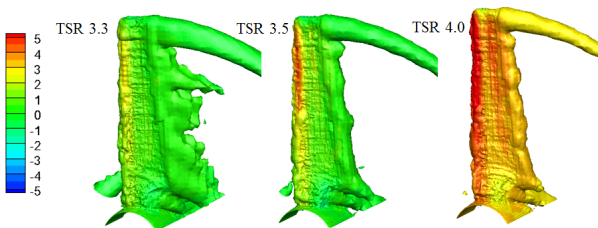


Fig. 9 Isosurface of vorticity magnitude = 50 (pressure side)

3. 결 론

본 연구는 터빈형상 최적화를 위한 기초 연구로서 EDISON CFD의 프로펠러 단독성능 해석 S/W와 SNUFOAM

ShipMesh Advanced 자동격자생성기를 이용하여 조류발전 터빈의 성능해석을 수행하였다. 형상파일 분할을 통해 날카로운 trailing edge영역의 mesh 개선 방안을 제안하였다. TSR 변화에 따라 수치해석을 수행하고 이를 실험결과와 비교 검증하여 합리적인 결과를 도출 하였다. 또한, 블레이드 전체를 모델링한 full body해석과 하나의 블레이드만을 모델링한 single body해석 결과를 비교하여 보다 경제적이면서 신뢰도 높은 해석프로세스를 제안하였다. 조류발전 터빈의 TSR 조건 변화에 따라 CFD해석결과가 실험결과와 잘 일치하는 것을 확인하였다. 낮은 TSR 조건에서는 국부적 와동발생에 의해 C_p 가 감소하는 것을 확인하였고 설계 TSR에서 가장 좋은 효율을 보임을 확인하였다. suction side의 압력 분포, 팁 와동의 강도가 성능개선을 위한 주요한 설계변수로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 논문은 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단 첨단 사이언스·교육 허브 개발 사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. NRF-2016M3C1A6937383)

References

- [1] 2007, Bahaj, A.S., et al. "Power and thrust measurements of marine current turbines under various hydrodynamic flow conditions in a cavitation tunnel and a towing tank." Renewable energy Vol.32, No.3, pp.407-426.
- [2] 2013, Park, S.W., "Performance analysis of a horizontal axis tidal stream turbine considering off-design conditions" Seoul National University, Seoul, Korea.
- [3] 2013, Lee, J.H., "Computational methods for open water performance prediction of tidal stream turbines" Seoul National University, Seoul, Korea.
- [4] 2014, Park, S.T., "The SPIV measurement of wake flow in current turbine & development of PIV algorithm using reiterated method of cross correlation plane" Seoul National University, Seoul, Korea.
- [5] 2006, Nilsson, H., "Evaluation of OpenFOAM for CFD of turbulent flow in water turbines." IAHR 2006.