

유체-구조 연성을 고려한 100 kW급 수평축 조류발전 터빈의 단독성능 해석

박세완¹ · 박선호^{2,†} · 이신형³

¹한국해양과학기술원

²한국해양대학교 해양공학과

³서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

Fluid-Structure Interaction Analysis for Open Water Performance of 100 kW Horizontal Tidal Stream Turbine

Se Wan Park¹, Sunho Park^{2,†} and Shin Hyung Rhee³

¹Korea Institute of Ocean Science & Technology, Daejeon 305-343, Korea

²Department Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

³Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University

요 약

조류발전 터빈의 효과적인 설계를 위해서는 날개의 변형을 고려한 해석이 필요하다. 날개에 가해지는 유체 하중은 날개 구조를 변형시키고, 터빈의 성능에 영향을 초래한다. 본 연구에서는 수평축 조류발전 터빈의 단독성능을 해석하는 전산유체역학 해석 절차를 개발하였다. 개발한 절차를 이용하여 조류발전 터빈의 성능을 예측하였고 실험결과와 비교하여 검증하였다. 검증된 전산유체역학 방법을 이용하여 복합재 터빈 날개에 대한 유체-구조 연성해석을 수행하였고 강체로 이루어진 터빈 날개에 대한 전산유체역학 해석 결과와 비교하였다.

Abstract – It is essential to consider the effect of blade deformation in order to design a better tidal stream turbine being operated in off-design condition. Flow load causes deformation on the blade, and the deformation affects the turbine performance. In the present study, CFD analysis procedures were developed to predict open water performance of horizontal axis tidal stream turbine (HATST). The developed procedures were verified by comparing the results with existing experimental results. Fluid-structure interaction (FSI) analysis method, based on the verified CFD procedure, have been carried out to estimate the turbine performance for a turbine with flexible composite blades, and then the results were compared with those for rigid blades.

Keywords: Horizontal Axis Tidal Stream Turbine, HATST(수평축 조류 발전 터빈), Computational Fluid Dynamics, CFD(전산유체역학), Fluid-Structure Interaction, FSI(유체-구조 연성 해석)

1. 서 론

최근 환경오염과 고 유가 문제 등으로 신재생에너지에 대한 관심이 점차 대두되고 있다. 신재생에너지 중에서도 조류 에너지는 예측성이 뛰어나 미래 전력 생산에 큰 잠재성을 지니고 있다.

조류에너지로부터 전력을 생산하는 여러 발전방식 중에 조류의 흐름과 로터의 회전축이 서로 수평하게 놓여있는 수평축 조류발전 터빈은 풍력 터빈이나 선박용 프로펠러와 작동원리가 유사하여 여러 연구 지식을 활용할 수 있으며, 수직축 조류발전 터빈에 비해 빠른 로터 스피드에서 최적 성능을 발휘하여 발전기를 연결하기에 용이할 뿐만 아니라, 다양한 방식의 피치 컨트롤 기법을 이용하여 실 운용조건에서 보다 효율적인 전력생산이 가능하다는 장점이 있다(Khan *et al.*[2009]). 본 연구에서는 수평축 조류발전 터빈을 대상으로 하여 연구를 수행하였다.

[†]Corresponding author: spark@kmou.ac.kr

본 논문은 2013년에 개최된 3회 International Symposium on Marine Propulsors와 한국전산유체공학회 춘계학술대회에서 발표한 논문을 근거로 하고 있음을 밝힙니다.

수평축 조류발전 터빈을 수치 기법으로 해석한 연구는 활발히 진행되었다. Lee *et al.*[2012]은 날개요소운동량이론(Blade Element Momentum Theory; BEMT)을 기반으로 한 코드와 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD)을 이용한 해석 기법을 개발하고 이들을 이용하여 수평축 조류발전 터빈의 성능을 추정하여 서로의 결과를 비교하였다. Batten *et al.*[2007]은 수평축 조류발전 터빈의 성능 예측 시험을 캐비테이션 터널에서 수행하고 개발한 BEMT 코드를 통해 추정된 결과와 비교하였다. Kinna *et al.*[2011]은 포텐셜 유동 기반의 와류격자법(Vortex Lattice Method)을 이용한 성능 해석을 수행하고, 해석 결과를 실험결과와 비교하여 검증하였다. Mason-Jones *et al.*[2008]은 CFD를 이용하여 날개 3개의 수평축 조류발전 터빈의 성능을 추정하고, Bristol 해협 의 실 해석자료를 바탕으로 수치 속도 구배를 고려할 수 있는 적합 식을 도출하여 이를 CFD 해석에 적용하였다. Harrison *et al.*[2010], Lee *et al.*[2010]등은 CFD를 이용하여 수평축 조류발전 터빈의 후류가 성능에 미치는 영향을 검토하였다. 수평축 조류발전 터빈의 후류 분포를 예측하고 인접한 터빈간의 최적 거리를 도출하였다. MaCombes *et al.*[2011]은 와도보존을 바탕으로 하는 수치 모델을 개발하여 수평축 조류발전 터빈의 비정상 후류를 추정하였다.

수평축 조류발전 터빈의 수치해석에 관한 많은 연구들은 터빈 날개를 변형하지 않는 강체로 가정한 상태에서 수행되었다. 그러나 터빈 날개의 코드에 비해 스패의 길이가 크다는 점과 높은 속도의 조류 흐름은 복잡재로 된 터빈 날개의 구조 변형을 유발시킬 가능성을 지니고 있다(Nicholls-Lee *et al.*[2011]). 따라서 수평축 조류발전 터빈 날개의 구조 변형 영향을 검토하기 위해서는 유체-구조 연성(Fluid Structure Interaction; FSI)작용을 고려한 해석 기법이 요구된다. Nicholls-Lee *et al.*[2011]은 복잡재 수평축 조류발전 터빈의 설계를 위한 FSI 시뮬레이션 기법을 개발한 바 있다. CFD와 유한요소법(Finite Element Method; FEM)을 약한 연성 기법(loose coupling method)으로 결합하여 직경 20 m, 날개 3개의 수평축 조류발전 터빈에 적용하였다. 그러나 아직까지 조류발전 터빈 분야의 연구는 기초 단계에 있기 때문에, 수평축 조류발전 터빈의 FSI에 대한 연구는 활발하지 못한 실정이다. 반면, 풍력 터빈이나 선박용 프로펠러 분야에서는 날개 변형을 다루는 연구가 활발히 진행되어 왔다. Bazilevs *et al.*[2011a, 2011b]은 풍력 터빈의 FSI 해석을 수행하기 위한 수치 기법을 개발하였으며, 실 스케일의 NREL 5 MW 해상 풍력 터빈에 적용하여 날개 변형 효과에 대해 검토하였다. Kim *et al.*[2012]은 풍력 터빈의 날개 변형 효과를 고려하기 위하여 약한 연성 기법으로 공력, 구조, 소음 해석을 수행하는 기법을 개발하였다. 이를 통해 날개 변형이 터빈 성능 및 소음에 미치는 영향을 분석하였다. 더불어, Young[2008]은 경계 요소법(Boundary Element Method; BEM)과 FEM을 결합하는 코드를 개발하여 복잡재 선박용 프로펠러의 거동을 분석하는 연구를 수행하였다.

그럼에도 불구하고, 아직까지 CFD와 FEM을 강한 연성 기법(Strong coupling method)으로 결합하여 수평축 조류발전 터빈의 FSI 해석을 수행한 연구는 진행된 바 없다. 강한 연성 기법은 유체장과 구조장을

동시에 해석하기 때문에 근사 오차 및 두 솔버(solver) 사이의 결과 이송과정에서 발생할 수 있는 수렴성 문제가 적어 약한 연성 기법에 비해 안정하다(Sieber[2002]).

본 연구의 목적은, 첫째, 강체 날개로 가정한 수평축 조류발전 터빈의 성능 해석을 수행하고 실험 결과와 비교하여 해석 기법을 검증한다. 둘째, 강한 연성 기법으로 복잡재 유연 날개에 대한 FSI 해석을 수행하고, 그 결과를 강체 날개 결과와 비교한다.

2. 터빈 형상 및 제원

본 연구에서 제안하는 해석 기법의 타당성을 보이기 위해 해석 대상 터빈을 정의하였다. 정격 출력 100 kW를 목표로 하여 설계된 수평축 조류발전 터빈은 날개 3개로 구성되었고, 직경은 8 m이며, NACA 633-418 단면을 이용하여 제작되었다. 단면 형상은 $r/R = 0.2 \sim 1.0$ 구간에서 사용되었으며, 허브 연결부에서는 2:1 비율의 타원 형상이 적용되었다. 날개 반경방향으로는 각 단면마다 최적 받음각을 유지하여 일정한 양력 계수를 도출하기 위해 단면마다 다른 비틀림 각을 갖도록 분포되었다. 코드 길이는 날개 루트부에서 0.68 m이며, 날개 끝에서 0.27 m이다. 각 단면의 비틀림 축 및 단면 중심은 날개 전연으로부터 각각 0.25C, 0.3C 떨어진 지점에 분포되었다. 설계 회전 속도는 24.72 rpm이며, TSR(Tip Speed Ratio)로 표현되는 운용속도는 2.7에서 10.4 범위 내에 있으며, 설계 TSR은 약 5.2이다.

3. 계산 방법

3.1 지배방정식

유동 해석 장의 속도와 압력을 도출하기 위해 질량 보존 방정식, 운동량 보존 방정식을 고려하였고, 난류의 영향을 고려하기 위해 질량 보존 방정식 및 운동량 보존 방정식을 시간 평균하여 난류모델을 적용하는 Reynolds Averaged Navier Stokes (RANS) 방정식을 도입하였다. 지배방정식에 대한 정의는 Park *et al.*[2012]에 기술되어 있다. 난류 모델로는 Menter[1994]가 제안한 $k-\omega$ SST 모델이 적용되었다.

3.2 수치 방법

유체장 해석을 위해 상용 CFD 프로그램인 ANSYS CFX 13.0, 구조장 해석을 위해 ANSYS Transient Structural이 채택되었으며, 두 솔버는 강한 연성 기법으로 결합되었다.

Fig. 1은 본 연구에 사용된 유체-구조 연성 해석 기법의 순서도를 나타낸다. Field loop는 유체 해석 장과 구조 해석 장의 독립적인 계산 과정을 나타낸다. 그림과 같이 두 해석 장은 동시에 해석을 진행하며, 각 해석 장의 수렴 기준에 맞는 해를 찾고 해의 수렴이 완료되면 Field loop를 종료한다. Coupling/stagger loop에서는 Field loop에서 구한 유체 해석 해 및 구조 해석 해를 교환하는 과정을 수행한다. 유체 해석을 통해 구한 구조물이 받는 유체력을 구조 해석 장에 전달하고, 구조 해석을 통해 구한 구조물의 변형 값을 유체

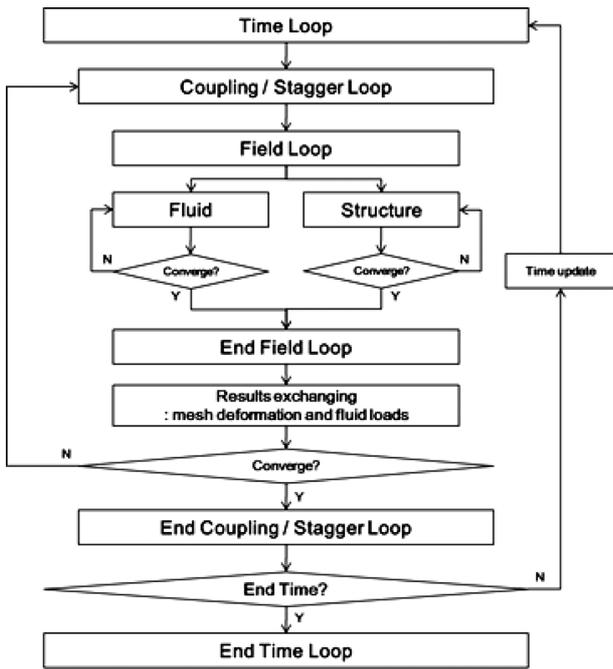


Fig. 1. Flow chart of strong coupling method for solving FSI problem.

해석 장에 전달한다. 이때 유체 해석 장에서는 변형된 구조물을 격자 변형 기법을 통해 반영하게 된다. 유체 해석 장 및 구조 해석 장에서는 새롭게 업데이트된 초기 값을 통해 다시 Field loop로 들어가 각각의 해를 찾기 시작한다. 현재 시간 상태에서 유체력 및 구조 변형 값의 변화가 없을 때까지 Field loop를 포함한 Coupling/stagger loop 과정은 계속해서 반복된다. Coupling/stagger loop가 수렴되면, 솔버는 다음 시간 상태로 넘어가서 위의 과정을 반복하게 된다.

비정상 시뮬레이션을 수행하였으나, 날개 변형 과정 보다는 최종 변형 상태에 초점을 맞추어 해석을 수행하였다. 압력 기반의 유한 체적 기법이 적용되었으며, 시간 항은 2차 정도의 내재적 기법을 통해 이산화 되었고, 이송 항은 2차 정도의 high resolution 기법으로 이산화 되었다. 속도-압력 연성은 Rhie and Chow[1982]가 제안한 이산화 기법으로 수행되었다.

3.3 해석 도메인, 경계조건 및 격자

양의 x축 방향을 유동 방향, 양의 y축 방향을 우변 방향, 양의 z축 방향을 수직상향으로 하는 직교좌표계를 도입하여, 좌표계의 원

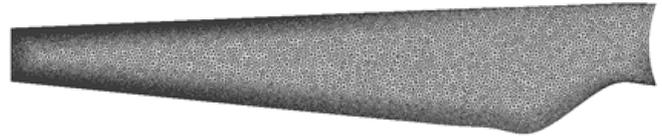


Fig. 2. Surface meshes for the fluid analysis.

점은 허브의 중심으로 하였다. 따라서 x축이 시계 반대 방향으로 회전하는 터빈의 회전축이 된다.

터빈 날개 단독상태에서의 회전 운동을 표현하기 위해 Rotating Reference Frame(RRF) 기법을 적용하였다. RRF 기법과 주기 경계조건을 이용하면 날개 3개의 터빈을 날개 1개의 부분모델로 간주하여 해석을 수행할 수 있다. 터빈 날개를 둘러싸는 영역은 비정렬 격자계로, 그 이외의 도메인 전체는 정렬 격자계로 구성된 하이브리드 격자를 사용하였다(Lee et al.[2012]). 회전하는 터빈 날개의 흡입면 전연 부 및 날개 끝에서 높은 속도의 유동에 의한 낮은 압력이 발생하기 때문에, 보다 정확한 예측을 위해 날개 전연 및 후연 부 표면에 보다 더 조밀한 격자를 분포시켰다. 150만개의 비정렬격자 셀과 50만개의 정렬격자 셀로 구성되어 총 200만개의 격자 셀이 해석에 사용되었다. Fig. 2는 터빈 날개의 흡입 면에 분포된 격자를 나타낸다. 압력 면에도 동일한 방식으로 격자가 분포되었다.

해석 도메인의 전체 길이는 터빈 직경의 9배이며, 반경방향으로는 3배이다. 도메인의 유입 부는 터빈 날개로부터 터빈 직경의 3배 만큼 떨어져 있으며, 유출 부는 6배 만큼 떨어져 있다. Fig. 3은 날개 변형 효과를 해석하기 위한 해석 도메인의 크기 및 경계조건을 나타낸다. 터빈 날개는 no slip 조건 및 유체-구조 연성 경계면이 설정되었다. 터빈 날개를 둘러싸는 비정렬 격자 영역과 그 이외의 정렬 격자 영역 사이에서는 General Grid Interface(GGI)기법을 이용한 비정합 연결 조건이 적용되었으며, 도메인의 양쪽 측면 경계면에서는 주기 경계조건이 설정되었다.

Fig. 4는 구조해석을 위한 날개 표면 격자를 나타낸다. 보다 정확한 변형량 예측을 위해 날개 전연 및 후연 부에 조밀한 격자를 분포시켰다. 터빈 날개는 복합재 E-glass reinforcing fiber로 모델링 되었으며, 재료 물성치는 Table 1과 같다. 조류발전 터빈 날개의 재료인 복합재에 대한 구조 물성치는 복합재 배치 설계에 따라 그 특성이 매우 다양하고 실제 설계 값을 얻기도 어렵기 때문에, 풍력발전 터빈의 관련 연구에서 참고한 값을 인용하여 사용하였다. (Bazilevs et al.[2011a, 2011b], Daniel and Ishai[1994]).

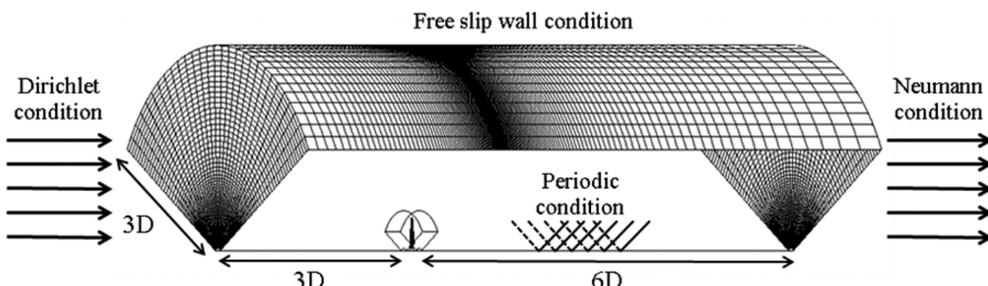


Fig. 3. Computational domain extent and boundary conditions for the simulation with blade deformation.

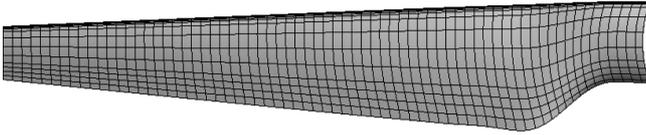


Fig. 4. Surface meshes for the structural analysis.

Table 1. Properties of the E-glass reinforcing fiber (Bazilevs *et al.* [2011a, 2011b], Daniel and Ishai [1994])

Property	Value
ρ (kg/m ³)	2100
E_1 (GPa)	39
E_2 (GPa)	8.6
G_{12} (GPa)	3.8
ν_{12}	0.28

4. 해석 결과 및 토의

4.1 불확실성 평가

적절한 수준의 격자가 사용되었는지 검증하기 위하여, 격자의 의존도 시험을 수행하였다. 격자 의존도 시험은 미국기계학회(American Society of Mechanical Engineers; ASME)에서 제안하는 절차에 따라 진행하였다(Celik *et al.*[2008]). Table 2는 날개 변형 효과 시뮬레이션에 사용된 격자의 의존도 시험 결과를 요약하여 나타낸다. 격자 수 998,300, 2,332,798, 5,523,567개의 세 가지 격자 케이스를 산정하였고, 각 격자 케이스 간의 셀 크기 대표 값(representative cell, h) 비율이 약 1.3으로 유지되어, 공간격자의 확장 비를 일정하게 유지하였다. 산정된 격자 케이스에 대해 설계 TSR 조건에서 해석을 수행하여 결과를 도출하였다.

날개에 작용한 토크는 각각 11273 Nm, 11790 Nm, 12040 Nm로 계산되었고, 해석의 apparent order는 2.61로 도출되어, 본 해석의 공간에 대한 해석 정도인 2차에 가까운 값으로 확인되었다. 외삽된 토크 값은 12264.01 Nm이며, approximate relative error는 2.08%, extrapolated relative error는 1.83%, grid convergence index는 2.33%로 도출되어, 적절한 수준의 격자수가 사용된 것으로 판단하였으며, 최종 해석은 medium 케이스인 2,332,798개의 격자를 사용하여 수행하였다.

Table 2. Verification test for the blade deformation problem

	Coarse mesh	Medium mesh	Fine mesh
Total # of cells	998,300	2,332,798	5,523,567
Representative cell, h	354.615	267.333	200.605
Ratio of h	-	1.33	1.33
Blade torque [Nm]	-11273	-11790	-12040
Difference rate	-	4.39%	2.08%
Apparent order, p		2.61	
Extrapolated value, Φ_{ext}^{21}		-12264.01	
Approximate relative error, ϵ_a^{21}		2.08%	
Extrapolated relative error, ϵ_{ext}^{21}		1.83%	
Grid convergence index, GC_{fine}^{21}		2.33%	



Fig. 5. Photograph of the test rig (Bahaj *et al.*[2007]) and constructed blade geometry.

4.2 날개 변형 검증

Bahaj *et al.*[2007]이 수행한 모델 스케일의 수평축 조류발전 터빈의 성능 계측 시험 결과와, 시험에 사용된 터빈과 동일한 모델에 대해 본 연구에서 정립된 CFD 해석 절차를 이용하여 도출된 해석 결과를 서로 비교하였다. Fig. 5는 캐비테이션 터널에서의 터빈과, 본 연구에서 제작된 날개 형상을 나타낸다. 날개 3개로 이루어진 직경 800 mm의 수평축 조류발전 터빈이 사용되었으며, 날개는 NACA 63-8xx 시리즈를 이용하여 총 17개의 단면으로 구성되어 제작되었다. 코드 길이, 두께, 피치 분포 등은 Bahaj의 문헌에 제공되었다. 이를 바탕으로 제작된 3D 형상 파일에 본 연구에서 제시한 격자 기법과 해석 기법을 적용하여 해석을 수행하였다.

실험은 2.4 m×1.2 m의 캐비테이션 터널에서 수행되었다. TSR에 대한 성능계수가 실험 결과로 발표되었으며, 터빈 성능은 0° yaw angle 및 25° hub pitch angle 조건에서 계측되었다. 터빈의 제원과 유입류 속도인 1.54 m/s는 실험과 본 연구의 해석에서 모두 동일하다. Fig. 6은 실험 결과와 해석 결과를 TSR에 대한 성능 계수 값

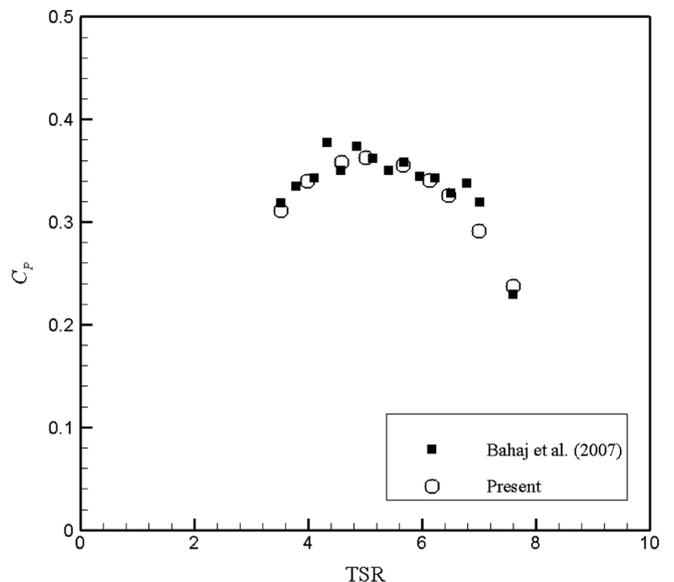


Fig. 6. Verification test results for the C_p .

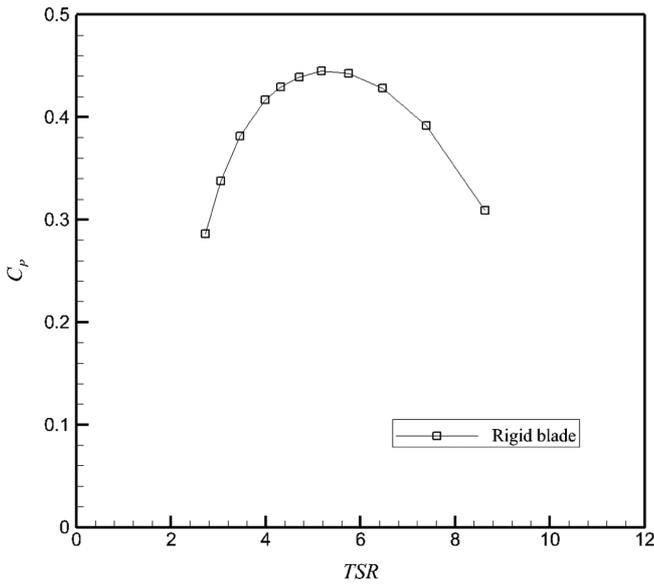


Fig. 7. C_p curve of the baseline turbine with rigid blade.

($C_p = \text{Power}/0.5\rho A U_\infty^3$)으로 나타낸 그림이다. 그림과 같이 본 연구에서 정립된 CFD 해석 기법의 결과가 실험결과와 경향성이 잘 일치하며, 이를 통해 본 연구의 해석 기법이 터빈 성능을 잘 예측한다는 것을 확인할 수 있다.

4.3 날개 변형 해석 결과

FSI 해석을 수행하기에 앞서, 같은 조건에서 날개를 강체로 가정한 해석을 수행하였다. Fig. 7은 강체 터빈 날개의 성능 곡선을 나타낸다. 날개 3개 수평축 조류발전 터빈의 전형적인 성능곡선 형태를 보이며, 최대 성능 계수는 설계 TSR인 5.2에서 도출되었다.

Fig. 8은 설계 TSR 조건에서 날개 압력면 및 흡입면의 압력 계수($C_{press} = (P - P_{ref})/0.5\rho U_\infty^2$) 분포를 나타낸다. 최저 압력은 흡입면 날개 끝 전연부에서 발생하였고, 최대 압력은 압력면 전연부에서 발생하였다. 터빈 날개의 압력면과 흡입면의 압력차이는 날개의 양력으로 나타난다.

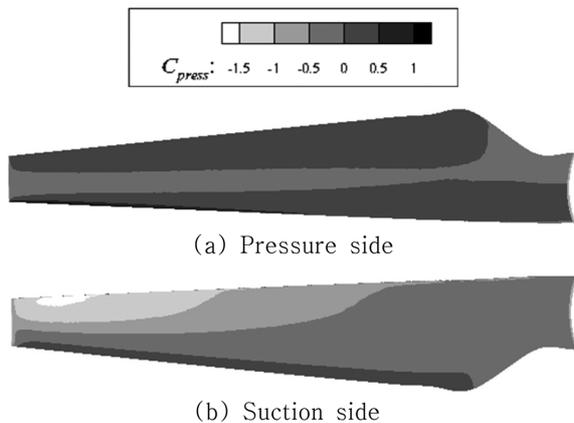


Fig. 8. Pressure coefficient contours on the pressure and suction sides of the baseline turbine with rigid blade.

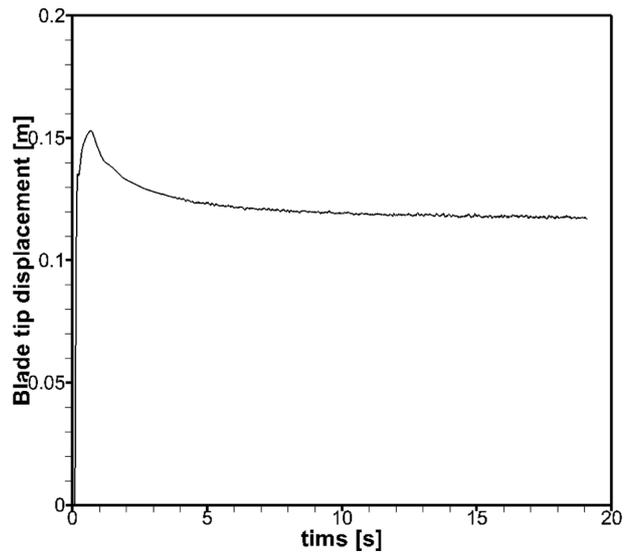


Fig. 9. Blade tip displacement.



Fig. 10. Deformed blade (true scale).

설계 TSR 조건에서 FSI 해석이 수행되었다. 조류의 흐름이 날개의 변형을 유발하였고, 변형 거동은 유체력과 구조 복원력이 같아지는 평형 상태에 도달하여 멈추었다. Fig. 9는 시간에 따른 날개 끝 변위를 나타낸다. 계산된 날개 끝 변위 량은 약 0.118 m이다. Fig. 10은 변형 전 및 후의 날개 형상을 나타낸다. 그림의 유선분포는 RRF 기법에 의한 회전 속도 성분을 제외하여 나타내었으며, 터빈 날개는 유동에 의해 하류 방향으로 변형되었다.

Fig. 11은 설계 TSR 조건에서 변형된 날개의 압력 계수 분포를 나타낸다. 최소 압력은 강체 날개와 마찬가지로 흡입면 날개 끝 전연부에서 발생하였으나, 흡입면에서의 압력 계수 값이 전반적으로 강체 날개 보다 낮은 것을 확인할 수 있다. 날개 변형이 흡입면에

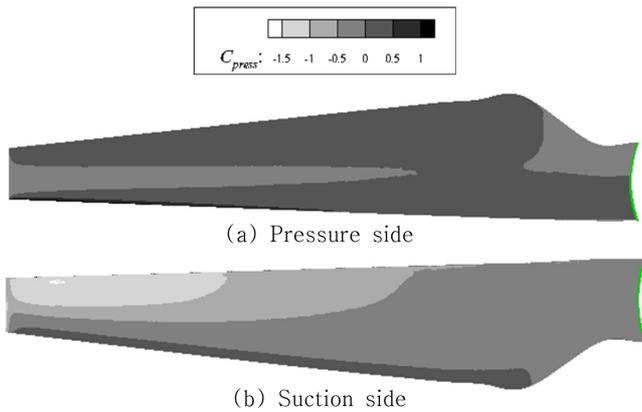


Fig. 11. Pressure coefficient contours on the pressure and suction side of the baseline turbine with flexible blade.

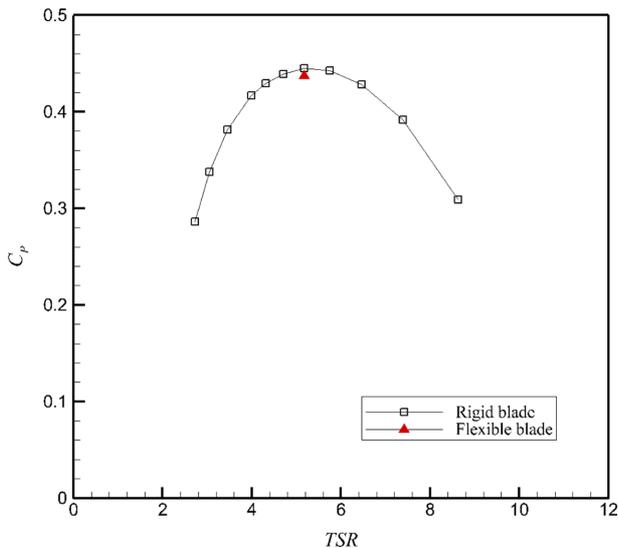


Fig. 12. C_p of the baseline turbine with rigid and flexible blade.

서의 압력 강하를 줄인 것으로 볼 수 있다. 이와 같은 결과로부터 날개의 변형을 고려하지 않게 되면, 흡입면에서의 캐비테이션 초생 조건을 과도하게 예측할 가능성이 있다.

Fig. 12는 터빈 날개 변형의 고려 유무에 따른 성능 계수 차이를 나타낸다. 설계 TSR에서 수행된 FSI 해석으로부터 도출된 변형된

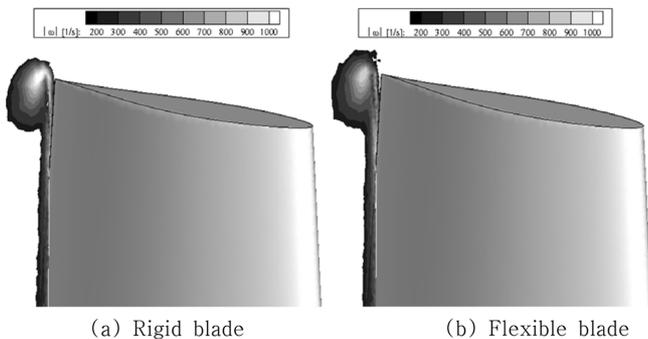


Fig. 13. Vorticity magnitude contours of the rigid and flexible blade.

날개의 성능은 강체 날개에 비해 약 1.9% 낮게 도출되었다. 이는 터빈 날개의 변형을 고려하지 않을 시에, 터빈의 성능을 과도하게 예측할 수 있다는 점을 시사한다.

Fig. 13은 날개 후류 지점에서 와도의 크기를 비교하여 나타낸다. 최대 와도의 크기 및 분포 영역이 날개 변형에 의해 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 터빈 날개의 변형을 고려하지 않을 시에 터빈의 소음 및 진동 문제를 과도하게 예측할 수 있다는 점을 나타낸다.

5. 결 론

CFD를 이용한 수평축 조류발전 터빈의 성능 해석 기법을 정립 하였다. 성능 해석 기법의 정도는 실험 결과와 그 결과를 비교하여 검증하였다.

수평축 조류발전 터빈의 날개를 강체로 가정한 조건에서, TSR 2.7~10.4 범위에 대해 성능 해석을 수행하였다. 또한, 날개를 복합 재 유연 재질로 가정한 조건에서, 설계 TSR 대한 FSI 해석을 수행 하여 날개 변형을 예측하고 터빈의 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 결과로부터 날개 변형을 고려하지 않을 시에는 터빈 성능, 캐비테이션 초생 조건, 소음 및 진동 문제 등을 과도하게 추정할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 수평축 조류발전 터빈의 보다 정확한 성능 추정을 위해 날개 변형 효과를 포함하는 비 설계 조건에 대한 고려가 반드시 요구된다는 것을 시사하였다.

후 기

본 연구는 지식경제부의 “첨단 융합기술 개발사업(2011-0020563)”의 지원과 산업통상자원부의 “해양플랜트 특성화대학 지원사업”과 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원 (2013T100200085)을 받아 수행한 연구과제입니다.

참고문헌

- [1] Bahaj, A.S. Molland, A.F. Chaplin, J.R. Batten, W.M.J., 2007, “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, pp. 407-426.
- [2] Batten, W.M.J. Bahaj, A.S. Molland, A.F. Chaplin, J.R., 2007, “Experimentally validated numerical method for the hydrodynamic design of horizontal axis tidal turbines”, *Ocean Engineering*, Vol. 34, pp. 1013-1020.
- [3] Bazilevs, Y. Hsu, M.-C. Akkerman, I. Wright, S. Takizawa, K. Henicke, B. Spielman, T. Tezduyar, T.E., 2011a, “3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part I: Geometry modeling and aerodynamics,” *Numerical Methods in Fluids*, Vol. 65, pp. 207-235.
- [4] Bazilevs, Y. Hsu, M.-C. Kiendl, J. Wuchner, R. Bletzinger, K.-U., 2011b, “3D simulation of wind turbine rotors at full scale. Part

- II: Fluid-structure interaction modeling with composite blades”, *Numerical Methods in Fluids*, Vol. 65, pp. 236-253.
- [5] Celik, I.B. Ghia, U. Roache, P.J. Freitas, C.J., 2008, “Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications”, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 130, No. 7, p. 078001.
- [6] Daniel, I.M. Ishai, O., 1994, *Engineering Mechanics of Composite Materials*, OXFORD UNIVERSITY PRESS.
- [7] Harrison, M.E. Batten, W.M.J. Myers, L.E. Bahaj, A.S., 2010, “A comparison between CFD simulations and experiments for predicting the far wake of horizontal axis tidal turbines”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 4, No. 6, pp. 613-617.
- [8] Khan, M.J., Bhuyan, G. Iqbal, M.T. Quaioco, J.E., 2009, “Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review”, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 1823-1835.
- [9] Kim, H. Lee, S. Son, E. Lee, S. Lee, S., 2012, “Aerodynamic noise analysis of large horizontal axis wind turbines considering fluid-structure interaction”, *Renewable Energy*, Vol. 42, pp. 46-53.
- [10] Kinnas, S.A. Xu, W., Yu, Y.-H., He, L., 2011, “Computational Methods for the Design and Prediction of Performance of Tidal Turbines”, *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*, Vol. 134, No. 1, pp. 011101-1-10.
- [11] Lee, J.H. Park, S. Kim, D.H. Rhee, S.H. Kim, M.C., 2012, “Computational methods for performance analysis of horizontal axis tidal stream turbines”, *Applied Energy*, Vol. 98, pp. 512-526.
- [12] Lee, S.H. Lee, S.H. Jang, K. Lee, J. Hur, N., 2010, “A numerical study for the optimal arrangement of ocean current turbine generators in the ocean current power parks”, *Current Applied Physics*, Vol. 10, pp. S137-S141.
- [13] Mason-Jones, A. O’Doherty, T. O’Doherty, D.M. Evans, P.S. Woolbridge, P.S., 2008, “Charaterisation of a HATT using CFD and ADCP site data”, *Proc World Rnewable Energy Congress, Glasgow, WREC-X*, pp. 941-946.
- [14] McCombes, T. Johnstone, C. Grant, A., 2011, “Unsteady wake modeling for tidal current turbines”, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 5, No. 4, pp. 299-310.
- [15] Menter, F.R., 1994, “Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications”, *AIAA Journal*, Vol. 32, pp. 1598-1605.
- [16] Nicholls-Lee, R.F. Turnock, S.R. Boyd, S.W., 2011, “A method for analysing fluid structure interactions on a horizontal axis tidal turbine”, *9th European Wave and Tidal Energy Conference, Southampton, UK, Sep. 5-9*.
- [17] Park, S.W. Park, S. Rhee, S.H., 2012, “Performance analysis of horizontal axis tidal stream turbine considering the effect of blade deformation”, *Proc Advances in Civil, Environmental, and Materials Research, Seoul, Korea, Aug. 26-29*.
- [18] Rhie, C.M. Chow, W.L. 1982, “A numerical study of the turbulent flow past an isolated airfoil with trailing edge separation”, *AIAA Paper 82-0998*.
- [19] Sieber, G., 2002, “Numerical simulation of fluid-structure interaction using loose coupling methods”, *PhD Thesis, at the Department of Numerical Methods in Mechanical Engineering, Darmstadt University of Technology*.
- [20] Young, Y.L., 2008, “Fluid-structure interaction analysis of flexible composite marine propellers,” *Fluids and Structures*, Vol. 24, pp. 799-818.

2013년 11월 27일 원고접수

2014년 1월 14일(1차), 2014년 2월 14일(2차) 심사수정일자

2014년 2월 17일 게재확정일자