

조류발전용 수평축 터빈의 형상설계 및 가변 부하를 이용한 성능실험

조철희*, 노유호, 이강희**

HAT Tidal Current Turbine Design and Performance Test with Variable Loads

Chul-Hee Jo*, Yu-Ho Rho and Kang-Hee Lee**

Abstract

Due to a high tidal range of up to 10 m on the west coast of Korea, numerous tidal current projects are being planned and constructed. The turbine, which initially converts the tidal energy, is an important component because it affects the efficiency of the entire system. Its performance is determined by design variables such as the number of blades, the shape of foils, and the size of a hub. To design a turbine that can extract the maximum power on the site, the depth and duration of current velocity with respect to direction should be considered. Verifying the performance of a designed turbine is important, and requires a circulating water channel (CWC) facility. A physical model for the performance test of the turbine should be carefully designed and compared to results from computational fluid dynamics (CFD) analysis. In this study, a horizontal axis tidal current turbine is designed based on the blade element theory. The proposed turbine's performance is evaluated using both CFD and a CWC experiment. The sealing system, power train, measuring devices, and generator are arranged in a nacelle, and the complete TCP system is demonstrated in a laboratory scale.

Key words

Tidal current power(TCP: 조류발전), Turbine(터빈), Blade element theory(날개요소이론), Computational fluid dynamics (CFD: 전산유체역학), Circulating water channel(CWC: 회류수조), Renewable energy(신재생에너지)

(접수일 2012. 2. 22, 수정일 2012. 3. 19, 게재확정일 2012. 3. 19)

* 인하대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University)

■ E-mail : chjo@inha.ac.kr ■ Tel : (032)860-7342 ■ Fax : (032)864-5850

** 인하대학교 조선해양공학과 (Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University)

■ E-mail : kanghee@inha.edu ■ Tel : (032)860-8849 ■ Fax : (032)864-5850

1. 서론

여러 대체에너지원 중 해양에너지인 조류발전 시스템은 큰 에너지밀도에 의해 잠재량이 매우 높다. 터빈은 유체의 가용 출력을 기계적인 회전 출력으로 변환시키는 장치로써, 조류

발전 시스템 개발에 매우 중요한 요소이다. 설계된 터빈은 성능을 검증하여 신뢰성을 확보해야 하고, 이를 통해 설계방법의 타당성 역시 평가될 수 있다. 날개요소운동량 이론을 기반으로 수평축 조류발전 터빈을 설계하는 연구가 소개되었으며^{(1),(2)}, Bahaj et al.는 수치해석적인 터빈 성능평가 기법을 실험으

로 검증하였다⁽³⁾. 국내에서는 실험을 통해 세 종류의 터빈 성능이 비교 검토되었고⁽⁴⁾, 다배열 된 수평축 조류발전 터빈의 간섭연구가 수행되었다⁽⁵⁾. 최근에는 해양에 설치되는 조류발전 시스템의 실용적인 터빈 성능평가를 위해 규칙파의 영향을 받는 터빈의 성능해석이 소개되었다⁽⁶⁾.

본 연구에서는 블레이드 요소 이론(Blade element theory)에 바탕을 두어 수평축 조류발전 터빈을 설계하고 CFD 해석을 통해 설계 방법의 타당성을 검토하였다. 또한 회류수조에서 가변 부하를 이용한 터빈 성능실험을 수행하였으며, 결과를 수치해석 결과와 비교하였다.

2. 블레이드 설계

2.1 날개 요소 이론

블레이드 익형 주위의 유동 메커니즘을 Fig. 1에 나타냈다. 익형으로 입사되는 상대유속 V_r 의 크기와 방향은 유속 V_w 와 날개요소의 회전방향 속도인 $r\omega$ 에 의해 결정되며, V_r 이 익형의 최적 받음각으로 유입되도록 설계되어야 한다. 유동각과 받음각에 의해 비틀림각 θ 가 정의되고 유동각은 블레이드 스패 별로 달라지므로, 블레이드 반경방향의 각 날개 요소마다 비틀림각이 연속적으로 변화하게 된다. 상대유속에 의해 수직방향으로 양력, 수평방향으로 항력이 발생되며 두 힘은 다시 회전방향의 토크와 회전면에 수직인 추력 성분으로 나뉜다.

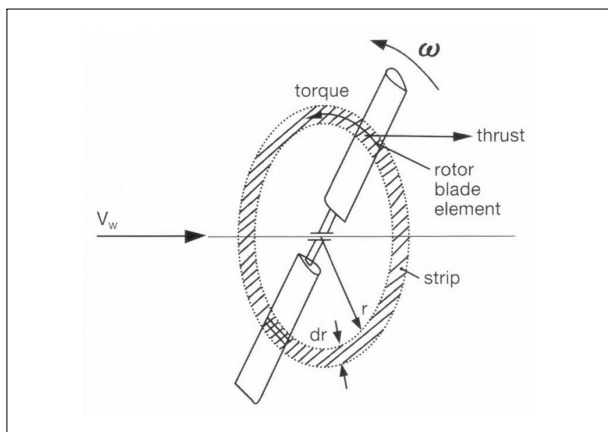


Fig. 1 Flow mechanism around blade element

2.2 설계 변수 결정

블레이드 설계는 익형을 선정하고 길이 방향으로 적절한 두께분포와 코드 길이 분포, 비틀림 분포를 갖도록 배열하는 과정이다. 설계를 진행하기 위해 익형선정이 우선되어야 하며 본 연구에서는 구조적인 안정성을 위해 두께가 큰 익형을 고려하였으며 영국 MCT 사의 Seagen 조류발전장치에 적용된 바 있는 S814를 선정하였다. Fig. 2는 S814의 형상을 보여준다.

터빈의 설계는 설치해역의 조류속도, 직경, 목표 발전용량, 정격 회전속도와 같은 주요 설계변수의 결정으로부터 시작된다. 국내에서 가장 빠른 조류속도는 약 6m/s 이며, 설계 유속을 5.5m/s로 가정하였다. 설계유속을 결정한 뒤, 식 (1)과 식 (2)를 통해 나머지 주요 설계변수들을 결정 할 수 있다. 식 (1)의 P는 발전용량으로써, 터빈이 발생시키는 동력과 동력 전달계통 및 발전기의 효율 η 의 곱으로 계산된다. 본 연구의 목표 발전용량을 300kW로 결정하였고, η 는 0.85로 가정한다. D는 터빈 직경으로써 발전 용량뿐만 아니라 회전수를 변화시키는 요소이다. 목표용량을 달성하기 위한 터빈직경은 동력계수를 0.4로 가정하여 4m로 계산되었다.

$$P [W] = \frac{1}{8} \rho \pi D^2 V_w^3 C_P \eta \tag{1}$$

$$\text{Tip speed ratio} = \frac{V_{tip}}{V_w} = \frac{D\omega}{2V_w} \tag{2}$$

2.3 날개 끝 손실

터빈은 익형의 양력에 의해 구동 되므로 블레이드 끝단에서 와류(tip vortex)가 발생하며, 이로 인한 날개 끝 손실(tip loss)이 발생한다. 이를 예측하기 위한 방법으로 1919년 Ludwig

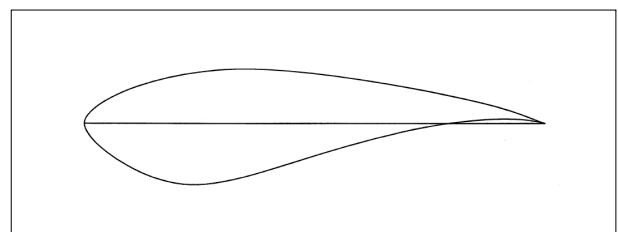


Fig. 2 Profile of the foil 'S814'

Prandtl이 제안한 식 (3)을 적용하였다.

$$f_t(\mu) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[e^{-\left\{ \frac{(N/2)(1-\mu)}{\mu} \right\} \sqrt{1 + (\lambda\mu)^2 / (1-a)^2}} \right] \quad (3)$$

흐름 유도계수 a는 Betz 한계로부터 유도되는 이상적인 값 1/3을 초기값으로 적용하며 반복적인 계산을 통하여 최적화된 흐름 유도계수를 도출한다. 이를 통해 최종적인 손실이 고려된 스펠별 코드길이와 비틀림 각을 계산할 수 있다.

2.4 코드길이 및 설치각

각 스펠에 대한 코드길이는 무차원 길이로 표현되는 식 (4)를 통해 결정 될 수 있다. 설계에 적용된 익형의 양력계수 (C_L), 블레이드 수(N), 설계 주속비(λ), 흐름 유도계수(a, a'), 터빈 반경(μ)을 이용해 각 스펠의 코드길이를 계산 할 수 있다.

$$\frac{C}{R} = \frac{2\pi}{\lambda \lambda C_L} \times \frac{4\lambda\mu^2 a'}{\sqrt{(1-a)^2 + [\lambda\mu(1+a')]^2}} \quad (4)$$

이 과정으로 계산된 현의 길이는 허브로 갈수록 급격히 증가하는 형태를 띤다. 일반적으로 제작의 편의성 및 재료 절감을 위하여 블레이드 팁으로부터 30% 위치를 기준으로 선행 근사된 코드길이를 적용한다.

$$\theta = \phi - \alpha \quad (5)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{1-a}{\lambda\mu(1+a')} \right) \quad (6)$$

각 스펠별로 설계 주속비에서 익형이 최적 받음각을 형성하도록 비틀림 각이 결정되어야 한다. 유동각, 받음각, 비틀림각의 관계는 식 (5)와 같다. θ 는 비틀림각, ϕ 는 입구 유동각, α 는 익형의 최적 받음각이다. 입구 유동각은 흐름 유도계수에 영향을 받으며 식 (6)과 같이 계산된다.

설계된 터빈의 결과를 확인해야 할 뿐만 아니라, 유동해석을 수행하기 위해 3D 모델링이 수반되어야 한다. 3D 전용 모델링 소프트웨어인 CATIA V5R19를 이용하여 설계된 블레이드를 형상화 하였다. 앞선 설계 단계를 통해 스펠별 익형의 좌표정보를 얻을 수 있고, Fig. 3과 같이 curve를 획득하였다. 이를 통해 블레이드 표면을 생성하고, Fig. 4와 같이 솔리드 모델을 완성하였다.

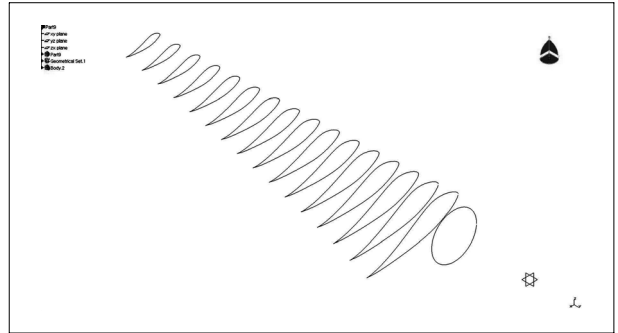


Fig. 3 Framework of the blade

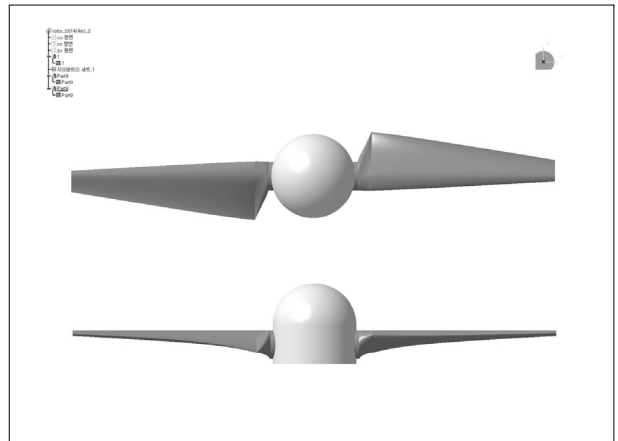


Fig. 4 Solid model of the turbine

3. CFD를 이용한 성능평가

3.1 터빈의 성능평가

터빈은 유체의 가용출력을 회전력으로 변환하는 장치이므로 에너지 변환효율을 의미하는 성능계수 (C_p , power coefficient)를 도출함으로써 터빈의 효율을 평가할 수 있다. 성능계수는 식 (7)과 같이 표현된다. 주속비는 터빈으로 유입되는 유속과 블레이드 팁의 선속도 비로써 터빈의 회전속도를 알 수 있는 무차원 값이며 식 (8)과 같이 표현된다. 유속, 터빈의 직경, 회전속도 등 많은 변수들에 의해 터빈의 출력 특성은 달라지나 출력특성을 주속비에 대해 표현하면 다양한 터빈들의 성능을 일관되게 비교할 수 있다. 따라서 터빈의 성능평가 시 주속비를 이용한 해석이 널리 사용 되고 있다.

$$C_p = \frac{T\omega}{\frac{1}{2}\rho A V_w^3} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_w} \quad (8)$$

3.2 격자계 및 경계조건

현재 터빈의 설계 및 성능해석의 표준으로 BEMT를 이용하는 것이 보편화 되어 있으나, 블레이드 국부요소간의 유동 독립성을 가정함으로써 3차원 유동현상에 의한 터빈의 특성을 분석할 수 없는 단점을 갖고 있다. 이에 반해 상대적으로 복잡한 Reynolds Averaged Navier–Stokes 방정식에 기반을 둔 CFD의 경우, 이론적으로 명확한 해석이 가능하고 다양한 물리적 변수를 표현할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 ANSYS사의 상용 소프트웨어인 ANSYS CFX-11.0을 사용하여, 회전체인 로터 주위의 유동해석을 수행하였다. 계산격자의 생성은 적용 난류모델의 특성에 따라 원활한 수렴 및 신뢰성 있는 결과를 확보하기 위해 y+, 경계층 격자 밀집도, 격자 형태, 종횡비(aspect ratio) 등을 신중히 고려해야 한다. 블레이드에서 발생하는 토크의 정확한 예측을 위해 블레이드 주변에 조밀한 prism-layer를 구성하였고, 나머지 영역은 tetra-prism 격자계로 구성하였다.

해석결과의 신뢰성을 확보하고 최적의 격자수를 찾기 위해 격자 의존성 시험을 수행하였다. 주요 해석 결과인 터빈의 토크값을 다양한 격자수에 따라 취득하여 Fig. 6과 같이 격자 의존성을 제거하기 위한 최소 격자수를 도출하였다. 최종 격자 정보를 Table 1에 나타냈다.

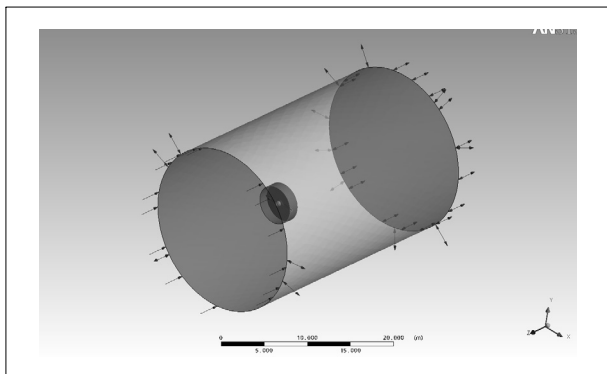


Fig. 5 Computational domain

수평축 터빈의 유동해석은 시간에 따른 블레이드 주위의 유동장 변화가 없다고 간주할 수 있으므로, 전체 유동장을 비압축성 3차원 정상상태로 가정하였다. 해석영역을 터빈을 둘러싸는 회전 도메인과 나머지 영역에 해당하는 정적 도메인으로 나누어 해석하였으며 유동영역이 Fig. 5와 같이 모델링되었다. 터빈으로부터 입구까지의 거리는 로터 직경의 3배, 출구까지의 거리는 6배, 외부유동영역의 직경은 내부회전영역의 4배이다.

입구는 수직 유입 유속 조건으로 설정하였고 출구는 기준 압력(대기압)에 대해 0기압으로, 실린더 옆면은 유체가 자유롭게 출입할 수 있는 조건을 부여하였다. 터빈 표면은 non-slip wall로 정의 하였으며 두 영역이 접하는 면은 각각 GGI (General grid interface) 방법에 의해 인터페이스 되었다. 난류모델은 SST(Shear stress transport)를 이용하였으며, Table 2에 경계조건을 기술하였다.

주속비에 따른 터빈의 성능을 고찰하기 위해 같은 유속에서 회전속도를 변화시키며 CFD를 수행하였고, 설계유속 5.5m/s 뿐만 아니라 입구 유속 조건을 3.0m/s, 4.0m/s, 5.0m/s, 6.0m/s로 변화 시켜 다양한 유속에서의 터빈성능을 평가하였다. 5가지 유속에서 주속비 1에서 10까지 해석을 진행하여

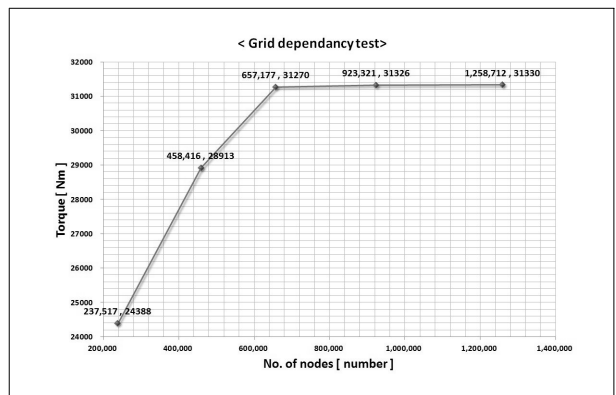


Fig. 6 Grid dependency test

Table 1. Mesh information

Mesh types	Units
Total number of nodes	657,177
Total number of tetrahedra	2,967,180
Total number of pyramids	2,107
Total number of prisms	232,767
Total number of elements	3,202,054

Table 2. Boundary condition

Description	Analysis condition
Working fluid	Water (isothermal, 25°C)
Inlet	Normal speed (3~6m/s)
Wall	Opening
Outlet	Opening
Interface area	Frozen rotor
Turbine	Wall (no slip)
Turbulence model	SST

총 50 케이스의 정적 유동해석이 수행되었다.

3.3 CFD 결과

해석결과를 바탕으로 유동에 의해 발생하는 주요 데이터를 취하여 성능을 분석하였다. 주속비의 변화에 대한 C_p 뿐만 아니라 터빈이 발생시키는 최대 토크, 동력계통의 손실이 고려된 발전기 입력토크, 전체 손실을 고려한 발전출력을 계산하였다. 터빈이 발생시키는 토크는 회전축과 같은 동력전달 계통의 설계 시 고려되어야 하는 중요한 변수이며 발전기 입력토크는 발전기의 설계 및 제어시스템 설계에 반영되어야 한다. 설계된 터빈으로 발생 가능한 발전출력은 동력전달 계통 및 발전기 효율을 0.85로 가정하여 계산하였다.

설계유속 5.5m/s를 포함하여 3.0m/s ~ 6.0m/s까지 총 5가지의 경우가 고려되었다. 한 유속에서 터빈 회전속도를 변화시키며 주속비 1에서 10까지 범위의 성능곡선을 Fig. 7에 나타냈다. 다양한 유속에서도 같은 형태의 C_p 곡선을 얻었다. 터빈의 출력 및 성능은 블레이드 익형 주위의 유동패턴에 의

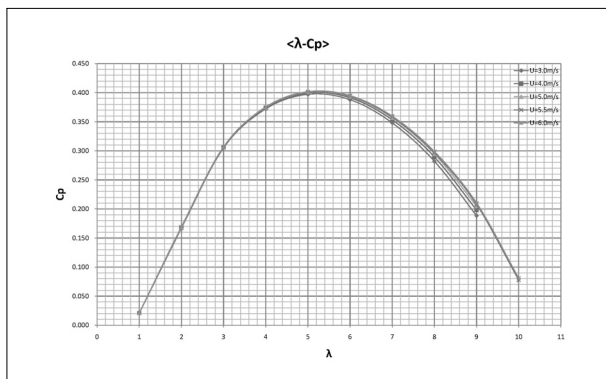


Fig. 7 Cp curves for various velocities

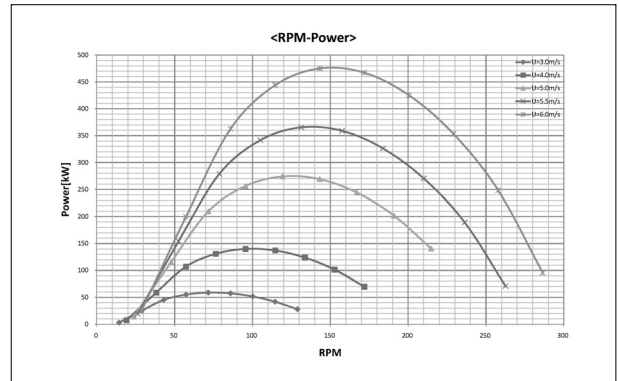


Fig. 8 Power curves for various velocities

해 결정되며, 유속과 블레이드 회전속도에 의한 받음각에 따라 유동패턴이 달라진다. 유속별 성능곡선이 일정한 이유는 각 TSR 마다 받음각, 양향비 등 유동 패턴이 같기 때문이며, 실속이 발생 되지 않는 구간 내에서 거의 일정한 효율이 발생되어야 하는 이론적인 바탕을 증명해주는 결과이다. 또한 TSR에 따른 C_p 가 구동 가능한 유속 범위 내에서 터빈의 고유 특성이라는 것을 보여준다. Fig. 8은 발전 출력곡선으로써, 전 유속에서 주속비 5일 때 최대 출력이 발생된다. 모든 유속에서 터빈이 최적 주속비에 가까운 속도로 구동되어야 하며, 최대 출력 점이 유속에 따라 변화할 때 발전부의 부하 조정을 통해 회전속도가 제어되어야 한다.

설계유속 5.5m/s에서 목표 발전용량인 300kW를 달성하였으며 넓은 회전속도 범위에서 안정적인 출력특성을 나타냈다. 주속비 5에서 40.1%로 최대효율을 보였고 설계유속에서의 정격 회전속도는 약 131RPM이다. 최대토크는 약 400ton-cm로 정격 회전속도보다 낮은 주속비 3에서 발생했다.

4. 실험

조류발전은 터빈 블레이드 설계기술, 동력계통 설계기술, 전력변환 시스템, 해양 구조물 설계 및 시공기술 등 다양한 분야의 접목이 요구되는 분야이다. 유사기술의 적용으로 요소기술 확보는 용이하나, 통합된 전체 시스템의 문제점 검토를 통한 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 본 연구에서는 터빈, 수밀장치, 발전기 등이 포함된 실험모델을 제작하였으며, 터빈 주속비에 대한 성능곡선 작성 및 전력특성을 통한 시스템

검증을 목표로 실험을 수행하였다.

4.1 실험장비

앞서 설계된 터빈의 성능을 CFD를 이용하여 검증하였으며, 실험을 통한 터빈특성을 비교 검토함으로써 설계 및 유동 해석 결과의 신뢰성 확보가 요구된다. 조류발전 터빈의 성능 실험은 대형 회류수조 장비가 요구되며 특히 수평축 터빈은 주요 장비들이 수중에 위치해야 하므로 수밀기술을 적용해야 하고, 이에 의한 동력 손실을 감안해야 한다. 회류수조의 제원을 Table 3에 나타냈다.

실험용 터빈은 실제모델의 1/8 크기로서 직경 500mm, 코드길이는 $\mu = 0.25$ 에서 63.1mm, $\mu = 1.00$ 에서 22.4mm로 제작되었다. 터빈의 출력을 측정하기 위해 토크미터, 타코미터 센서가 수중 함체 내부에 설치되었으며, 발전기를 장착하여 실제 전력이 발생 되도록 하였다. 회류수조 외부에 컨트롤 판넬을 제작 및 설치하여 발전기의 파워 케이블 및 데이터 케이블을 연결하였다. 측정 데이터 출력, 가변저항 연결을 통한 부하조절, 전력 계측 및 소비 등 컨트롤 판넬을 통해 시스템 전체를 제어 하였다.

Fig. 9와 같이 기어리스 발전기를 적용한 실험장치가 회류

Table 3. Specification of CWC

	Main particular	Measuring section
Lenth (m)	6.0	2.3
Breadth (m)	1.0	1.0
Height (m)	3.0	0.9
Max. Velocity (m/s)	1.2	-



Fig. 9 Experiment arrangement

수조에 설치되었다. 기어리스 방식은 증속기 없이 터빈의 회전속도로 발전기가 구동되므로 동력계통의 손실을 크게 줄일 수 있고, 주 고장원인을 제거함으로써 유지보수에 유리하다. 블레이드와 장비 사이의 상호작용을 감소시키기 위해 회전축을 길게 설치하고 함체의 외형을 유선형으로 제작하였다.

4.2 실험 방법

CFD를 통한 터빈 성능해석과 같이, 같은 유속에서 터빈의 회전속도를 조절하여 주속비에 대해 변화하는 토크를 측정하고 동력계수 C_p 를 계산하는 방법을 적용하였다.

발전기 후단에 가변저항을 설치하여 부하 변동을 통해 일정 유속에서 터빈의 회전속도를 제어 할 수 있도록 하였으며, 터빈과 발전기 사이에 장착 된 토크미터에서 토크를 측정하였다.

기어리스 발전기를 적용함으로써, 터빈과 발전기의 회전속도는 동일하다. 타코미터 센서를 발전기 후단에 설치하여 회전속도의 실시간 모니터링이 가능하도록 하였다. 실시간 회전속도와 가변저항으로 낮은 범위의 주속비부터 무부하 운전까지 다양한 RPM을 구현하였다.

유속 1m/s에서 1A 단위로 부하를 주어 회전속도를 변화시켰으며, 주속비에 따른 터빈의 토크, RPM, 전력이 측정되었다. 토크와 회전속도 데이터를 이용해 터빈의 출력을 계산하였다.

4.3 실험 결과

발전부의 부하조절로 여러 회전속도에서 토크를 측정하였고 터빈의 효율을 계산하였으며, 성능실험을 통해 Fig. 10과 같이 터빈의 성능곡선을 얻었다. 200RPM(TSR: 5.2)에서 약 34%의 최대효율을 보였으며 CFD해석 결과보다 약 6% 낮았다.

터빈 효율 값이 국부적으로 차이를 보이는 것이 아니라 전체적으로 낮게 측정 되었으며 실험과정에서 물리적 손실이 발생한 것으로 판단된다. 터빈 출력 변수 중 하나인 토크를 측정하기 위해 토크미터가 사용 되었으나, 수밀장치와 발전기 사이의 너셀 내부에 위치하여 수밀장치에 의해 손실되는 토크는 측정 할 수 없다. 즉 최대효율의 오차가 발생한 원인은 터빈 허브보다 큰 직경을 가진 수중함체로 인한 유속 감소

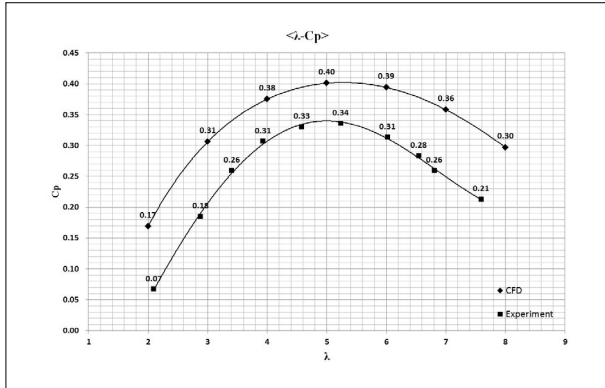


Fig. 10 C_p curve

현상 및 수밀장치의 마찰손실에 의한 것으로 판단된다.

본 연구에서는 날개요소 이론을 바탕으로 수평축 조류발전용 터빈을 설계하고 3차원 유동해석을 이용한 성능평가, 회류수조 실험을 통한 검증이 수행되었다. S814 익형이 적용된 직경 4m의 수평축 조류발전 터빈을 설계하였고 CFD를 이용한 성능평가 결과, 주속비 5에서 40%의 최대 효율이 발생했다. 설계유속 5.5m/s에서 300kW의 목표용량을 달성하였으며, 다양한 유속에서의 성능곡선 및 토크곡선을 도출하여 최적 주속비 제어를 위한 기반을 마련하였다. 터빈이 발생시킨 토크는 동력계통과 발전 제어 시스템 설계에 제공되어야 하는 매우 중요한 요소이며, TSR 3에서 400ton-cm의 최대 토크가 발생하였다.

수평축 조류발전터빈의 성능측정을 위해 수중장비를 제작하여 실험을 수행하였다. 회류수조 실험 시 blockage effect를 고려하여 실험장치의 크기를 결정해야 하며 측벽에 의한 영향을 제거해야 한다. 본 연구에서는 기어리스 발전기를 너셀 내에 설치하여 전력을 측정하였으며, 발전기를 구동하기 위해 고 출력이 확보 되어야 하므로 측벽 효과가 발생하는 범위의 터빈직경이 선정되었다. 발전기 및 가변 부하장치를 적용하여 터빈의 RPM 제어에 성공 하였으며 터빈의 동력에서 발전 출력까지, 에너지 변환의 전 과정을 실험 스케일로 실증하였다. 추후 회류수조 환경을 고려한 유동해석을 통해 성능 실험 결과와의 비교가 요구되며 blockage ratio에 의한 터빈 성능변화 또한 분석 되어야 한다.

회류수조 및 성능실험 장비를 이용하여 설계된 터빈의 성능을 평가하였다. 부하를 조정하여 터빈 성능곡선을 얻음으로써 실험장비의 신뢰성을 검증하였으며, 주속비 5.2에서 최

대효율 34%가 측정되었다. CFD를 이용한 성능해석 결과와 약 6% 오차가 발생했다.

5. 결론

조류발전 시스템은 잠재량이 매우 큰 해양에너지로써, 정확한 발전량을 예측할 수 있고 날씨나 계절에 관계없이 발전 가능한 신뢰성 있는 에너지원이다. 수평축 터빈 블레이드의 설계는 스패에 따라 익형의 설치각과 코드 길이를 결정하여 배치 나가는 과정이며, 본 논문에서 설계 과정을 제시하였다.

설계된 터빈을 검증하기 위한 성능평가 방법은 매우 중요하며 CFD 및 실험을 통한 터빈 성능해석이 모두 수행되었다. 터빈의 성능곡선이 도출되었으며 주속비 5에서 최대 효율 40.1%가 발생하였다. 실험을 통한 성능검증을 위해 토크미터, RPM 센서, 발전기 등이 포함된 실험장비를 제작하였다. 일정한 유속에서 가변 부하로 RPM을 제어하고 토크를 측정하여, 터빈 성능곡선을 도출하였다. 터빈의 출력뿐만 아니라 발전 전력까지 측정함으로써, 조류발전의 에너지변환 전 과정을 실험으로 검증하였다.

후 기

본 과제(결과물)는 국토해양부의 지원으로 수행한 해양에너지 전문인력 양성사업의 연구결과입니다.

본 연구는 지식경제부 신재생에너지기술개발사업의 일환(20093021070010)으로 수행되었습니다.

본 연구는 인하대학교의 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- [1] Batten, W. M. J., Bahaj, A. S., Molland, A. F. and Chaplin, J. R., 2006, "Hydrodynamics of Marine Current Turbines", Renewable Energy, Vol. 31, No. 2, pp. 249-56.
- [2] Baltazar, J. and Campos, J., 2008, "Hydrodynamic

Analysis of Horizontal Axis Marine Current Turbine with a Boundary Element Method”, Proceedings of the 27th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

- [3] Bahaj, A., Batten, W. and McCann, G., 2007, “Experimental verifications of numerical predictions for the hydrodynamic performance of horizontal axis marine current turbines”, Renewable Energy, Vol. 32, No. 15, pp. 2479-2490.
- [4] Jo, C. H., Kim, K. S., Min, K. H., Yang, T. Y. and Lee, H. S., 2002, “Study on HAT Current Generation Rotor”, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 16,

No. 1, pp. 78-82.

- [5] Jo, C. H., Lee, K. H. and Yim, J. Y., 2010, “A study on the interference effects for tidal current power rotors”, Journal of Science China: Technological Sciences, Vol. 53, No. 11, pp. 3094-3101.
- [6] Faudot, C. and Dahlhaug, O. G., 2011, “Tidal turbine blades: Design and dynamic loads estimation using CFD and blade element momentum theory”, Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering.

조 철 희



1984년 인하대학교 조선공학과 공학사
 1985년 미국 Steven Institute of Technology
 해양공학과 공학석사
 1991년 미국 Texas A&M University 해양공학과
 공학박사

현재 인하대학교 조선해양공학과 교수
 (E-mail : chjo@inha.ac.kr)

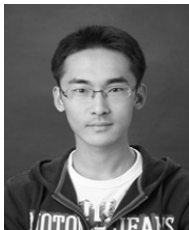
노 유 호



2009년 인하대학교 선박해양공학과 공학사
 2011년 인하대학교 조선해양공학과 공학석사

현재 인하대학교 조선해양공학과 박사과정
 (E-mail : aes102@hanmail.net)

이 강 희



2009년 인하대학교 선박해양공학과 공학사
 2011년 인하대학교 조선해양공학과 공학석사

현재 인하대학교 조선해양공학과 박사과정
 (E-mail : kanghee@inha.edu)