

쉬라우드 조류발전장치의 축소모형실험을 통한 발전 성능 분석 Experimental Performance Analysis using a Compact Scale Model for Shroud Tidal Current Power Generation System

한석종* · 이욱재** · 박다인* · 이상호* · 정신태** · 이상설***

Seok Jong Han*, Uk Jae Lee**, Da In Park*, Sang Ho Lee*, Shin Tark Jeong** and Sang Seol Lee***

요지 : 해수의 유속과 전기 부하에 따른 쉬라우드 조류발전 시스템의 유동장 특성과 발전 성능 분석을 위하여 회류수조를 이용한 축소모형실험을 수행하였다. 발전기에 연결되는 전기 부하에 대하여 터빈 블레이드의 분당 회전수와 발전기의 전압, 전류를 동시에 측정하여 전기적 출력을 계산하였으며 일정한 유속 조건에서 부하에 따라 큰 차이가 나타났다. 전기 부하가 감소함에 따라 터빈의 분당 회전수는 특정 구간에서 급격히 증가하였고, 평균 약 2배 정도 증가하였다. 또한 부하의 감소와 함께 전력이 급격히 상승하였고, 일정 구간에서 최대 전력지점을 보인 후 낮아지게 된다. 이와 함께 실험 유속이 증가함에 따라 높은 전기 부하에서 최대 전력지점이 나타났다. 이러한 유속 조건과 전기적 부하에 따른 쉬라우드 조류발전 시스템의 유동장 특성과 발전 성능 분석에 대한 결과는 효율적인 쉬라우드 조류발전 시스템 개발에 필요한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 조류발전, 쉬라우드 시스템, 해수유동특성, 전기 부하, 실험 분석

Abstract : Experimental investigation was performed to analyze the flow field characteristics and power generation performance for a shroud tidal power generation system. Electrical power output was compared with the rotational speed of the turbine blade and electric load connected to the generator for various flow velocity. As the electrical load decreased, the speed of the turbine increased rapidly and reached by about 2 times. The power output also increased remarkably with the decrease of load, and then decreased after maximum power point. In addition, the maximum power point appeared at high electrical loads as the experimental flow velocity increased. These results of the flow field characteristics and power generation performance analysis of the shroud tidal power generation system variation with the flow velocity conditions and electrical load are expected to be the basic data necessary for the development of efficient shroud tidal power generation system.

Keywords : tidal current power generation, shroud system, seawater flow characteristics, electrical load, experimental analysis

1. 서 론

최근 화석에너지연료의 빠른 소모와 환경오염에 대한 규제 강화로 인하여 신·재생에너지 개발에 대한 필요성이 점차 증가하고 있다. 이에 따른 다양한 신·재생에너지 중 해양에너지는 계절의 변화에 크게 의존하지 않고, 청정도 및 경제성이 우수하여 국내외에서 지속적으로 관심이 증가하고 있다. 해양 자원을 이용하여 해수의 흐름을 통해 자연적으로 발전이 가능한 조류발전은 흐름이 갖는 해수 운동에너지를 전기적 에너지로 변환하며 발전하는 방식으로 기대되는 미래의 에너지 자원이다(Lee et al., 2019). 이러한 신·재생에너지의 다양한

응용과 함께 조류발전 장치와 터빈 블레이드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 기존의 주요 연구로서 터빈 블레이드의 발전성능 연구와 관련하여 Jo et al.(2012)은 블레이드 요소 이론을 바탕으로 수평축 조류발전 터빈의 전산해석과 함께 가변 부하에 대한 터빈 성능실험을 수행하여 비교하였다. 그 결과로 터빈의 성능곡선이 도출되었으며, 조류발전장치의 설계 과정을 제시하였다. Tian et al.(2018)은 저유속에서 사용가능한 수평축 조류발전기에 대하여 수조실험과 수치해석을 수행하였고 전기적 부하에 대한 수평축 터빈의 최대 전력과 효율을 분석하여 실제 해역에서 사용 가능성을 예측하였다. Lee et al.(2016)은 수치해석을 이용하여 인접한 조류발

*원광대학교 기계공학과(Corresponding author: Sang Ho Lee, Department of Mechanical Engineering, Wonkwang University, Iksandae-ro 460, Iksan, Jeonbuk 54538, Korea, Tel: +82-63-850-6687, Fax: +82-63-850-6691, lsheagle@wonkwang.ac.kr)

**원광대학교 토목환경공학과(Department of Civil and Environmental Engineering, Wonkwang University)

***원광대학교 전기공학과(Department of Electrical Engineering, Wonkwang University)

전 수직축 터빈의 회전방향 및 거리를 주요 변수로 하여 성능변화를 분석하였다. 수직축은 터빈이 인접할 때 성능이 향상되는 면이 있으며 이를 고려한 배치가 반드시 필요하다고 제안하였다. 또한 Lee et al.(2015)은 조류발전용 이중반전 터빈에 대해 수치해석과 실험적 방법을 사용하여 이중 로터 사이의 거리가 터빈의 성능과 효율에 미치는 영향을 분석하였다. 이중 터빈이 단일 터빈보다 더 많은 전력을 생산한 것으로 나타났으며, 블레이드 간격 거리가 터빈의 출력 및 효율에 영향을 미치는 것으로 보여주었다. 이와 함께 시스템의 발전 성능을 증가하기 위하여 터빈으로 유입되는 해수의 유속을 증가시킬 수 있는 형상 설계가 요구된다. 이와 관련하여 Jo et al.(2009)은 덕트형 구조체를 수반할 경우 유속증폭을 예측하였으며 덕트 내에 발전터빈이 위치했을 때 성능계수가 증가할 것으로 제안하였다. Fleming et al.(2016)은 양방향 조류발전 덕트의 단면 형상에 대해 CFD 해석을 수행하여 덕트 곡률 및 두께가 터빈 성능에 미치는 영향을 분석하였다. 두꺼운 덕트의 경우 내부 흐름을 증가할 수는 있지만 더 큰 점성 손실 때문에 발생 전력에는 손해를 보는 결과를 나타내었다. Kim et al.(2012)은 조류발전용 쉬라우드의 기하학적 형상각도 변화에 따른 CFD 해석으로 내부의 해수 유동장을 분석하여 유속 증폭 특성을 비교하였다. 그 결과로 실린더-디퓨저 형태에서 노즐-디퓨저보다 내부 유속이 조류속도에 비해 크게 증가함을 제안하였다. Lee et al.(2018)은 수치해석을 이용해 쉬라우드의 구조 내 유속분포에 대해 상부 높이가 상승할수록 쉬라우드 중심부의 해수 속도가 현저하게 증가하는 경향을 예측하였다.

조류발전 시스템은 고정 방식에 따라 파일 고정식, 착저식, 계류식, 자중고정식 등으로 구분되며 설치 대상의 환경 특성에 따라 결정된다. 이들 중에서 자중고정식은 다른 고정 방식과 다르게 별도의 지지구조물이 불필요하고 발전시스템 자체의 자중으로 고정하므로 비용이 감소하고, 설치가 간단하다는 장점이 있다. 앞선 연구들은 대부분 계류식 및 착저식에 대한 연구 결과를 나타내며, 자중고정식 덕트형 조류발전 시스템의 성능 분석에 대한 연구가 부족한 실정이다. 실제 해역에서 조류발전장치를 사용하기 위해서는 설치 대상의 평균 유속과 여러 가지 환경을 고려해야 한다. 특히 터빈 블레이드와 연결되는 발전기의 전기적 출력을 측정하여 실질적인 발전 성능 분석에 대한 체계적인 분석이 필요하다. 본 연구에서는 해수의 유속에 따른 유동장 내 쉬라우드 조류발전 시스템의 성능분석을 위하여 회류수조를 이용한 축소모형실험을 수행하였다. 이를 위해 수조 내 발전장치에 연결되는 전기 부하량에 따라 터빈 블레이드의 분당 회전수와 전기적 출력을 측정하였으며, 전기적 부하의 변화에 따른 축 회전 및 발전 특성을 분석하였다. 이러한 해수 유속에 따른 발전 성능 분석에 대한 결과는 효율적인 자중고정식 쉬라우드 조류발전 시스템 개발에 필요한 기초 자료가 될 수 있을 것으로 기대된다.

2. 조류발전 성능 시험

2.1 축소모형 형상비

원형 발전장치의 공간 및 비용적인 측면을 고려하여 상사법칙을 따르는 축소모형을 제작하여 실험에 이용한다. 이를 위해 중력에 의한 자유수면을 포함한 개수로의 흐름에 대해 Froude 상사법칙을 사용하여 원형과 모형 사이에 다음과 같은 식(1)이 적용된다.

$$\left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_m = \left(\frac{v}{\sqrt{gL}}\right)_p \quad (1)$$

여기서 m 과 p 는 각각 모형과 원형을 나타내며, v [m/s]는 유체의 속도, L [m]은 발전장치의 축 방향 길이, 그리고 g [m/s²]는 중력 가속도이다. 따라서 축소모형의 분석 대상을 3/100 정도의 형상비로 제작하여 실험에 사용하였다.

2.2 쉬라우드 조류발전시스템

3D CAD 프로그램인 SolidWorks(2018)를 이용하여 쉬라우드를 포함한 조류발전 구조체와 터빈 블레이드 형상을 모델링하였다. Fig. 1은 실험에 사용된 터빈 블레이드 형상을 나타내었고 (a)와 (b)는 터빈의 정면과 측면이며, Table 1에 터빈 블레이드의 제원을 제시하였다. 쉬라우드 형상체는 유속이 증가할 수 있도록 노즐-실린더-디퓨저의 내부형상을 포함하고 있다. Fig. 2(a)는 쉬라우드 구조체의 정면, (b)는 쉬라우드 내부에 터빈 블레이드가 포함된 등각도이다. Table 2는 쉬라우드의 기하학적 형상 제원을 각각 나타낸 것으로 쉬라우드 중심부의 입구 대비 직경비와 면적비는 약 1.5와 약 2.3

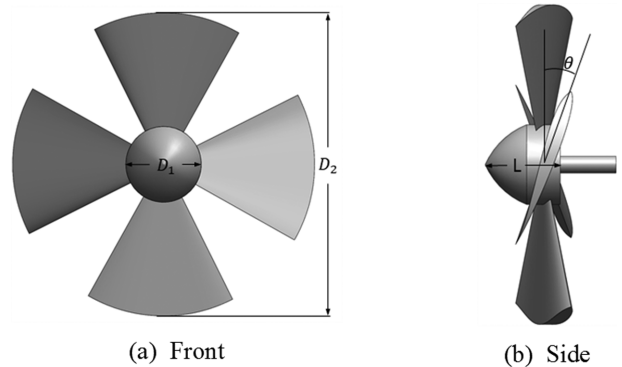


Fig. 1. 3D CAD model for the turbine blade.

Table 1. Turbine geometry

	Parameters	Specifications
Hub diameter	D_1	0.014 m
Turbine diameter	D_2	0.057 m
Hub length	L	0.013 m
Pitch angle	θ	20°
Number of blades	-	4
Airfoil model	-	NREL S814

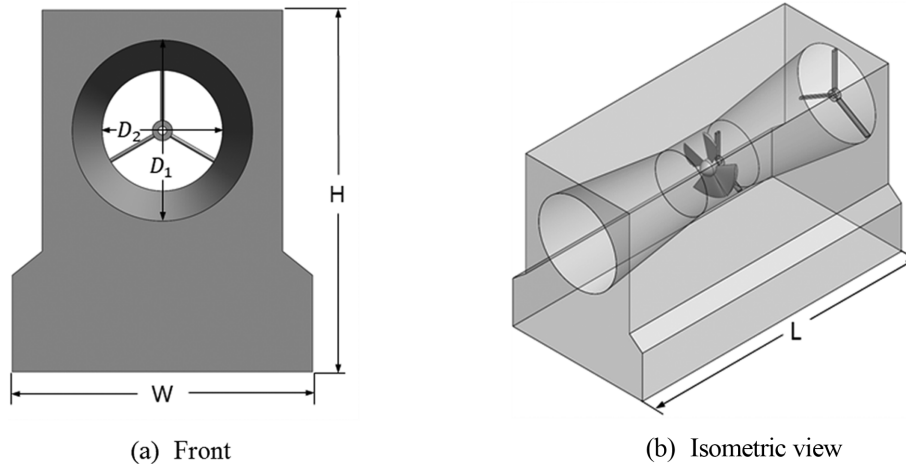


Fig. 2. 3D CAD model for the shroud system.

Table 2. Specification of shroud system

	Parameters	Specifications
Inlet diameter	D_1	0.09 m
Center diameter	D_2	0.06 m
Width	W	0.15 m
Length	L	0.30 m
Height	H	0.18 m

이다(Lee et al., 2019). 이와 함께 터빈 블레이드와 발전기를 연결하는 회전축의 지지를 위해 쉬라우드 내부에 삼각대 형태의 구조물을 추가하였다. Fig. 3(a)와 (b)는 실험에 사용된 조류발전장치의 정면과 등각도를 나타낸 것이며 모델링한 쉬라우드와 터빈 블레이드를 통해 ABS Like 레진 재질을 사용하는 SLA 방식의 정밀 3D 프린터(Shining 3D iSLA-650)를 이용하여 제작하였다.

2.3 회류 수조 구성

축소모형실험을 통해 시험부 입구 유속에 따른 쉬라우드 조류발전시스템 내 터빈 블레이드의 분당 회전수와 전기적 출력력을 분석하기 위하여 회류수조를 구성하였다. 수조의 총 길

이는 9 m이며 시험부 입구에서 유동이 완전 발달된 유동(Fully Developed Flow)이 되도록 하기 위하여 약 4 m까지는 입구 및 안정화 영역, 이후 4~6 m는 시험부, 그리고 6~9 m는 배출구로 각각 구성하였다. 또한 시험부 유동 방향으로 균일한 유속을 만들기 위해서 안정화 영역에 허니콤장치(Honeycomb)를 설치하였다. 허니콤 영역을 지난 후 쉬라우드 구조체 전방 약 0.2 m에 위치한 면에서 쉬라우드 입구 중심을 기준으로 15개 지점에 대해 유속을 측정하였다. 이를 통해 면 평균속도를 기준으로 유속 균일도를 확인하였다(약 $\pm 4.91\%$ 이내). 그 외 폭과 높이는 약 0.4 m이다. 수조는 투명 아크릴판(5 t)으로 구성되어 있으며, 배관은 SUS304와 PVC 재질의 파이프를 이용하여 연결되었다. 회류수조의 흐름을 발생시키는 펌프의 용량은 20마력이며, 유량은 배관에 연결된 글로브밸브(직경 125 mm)를 통하여 조절하였다. 다음 Fig. 4는 수조 내 유동 흐름도를 나타낸 것이다.

2.4 측정 장치 구성

2.4.1 유속 측정

시험부 내 유속 분포 분석을 위한 장치 구성으로 프로펠러

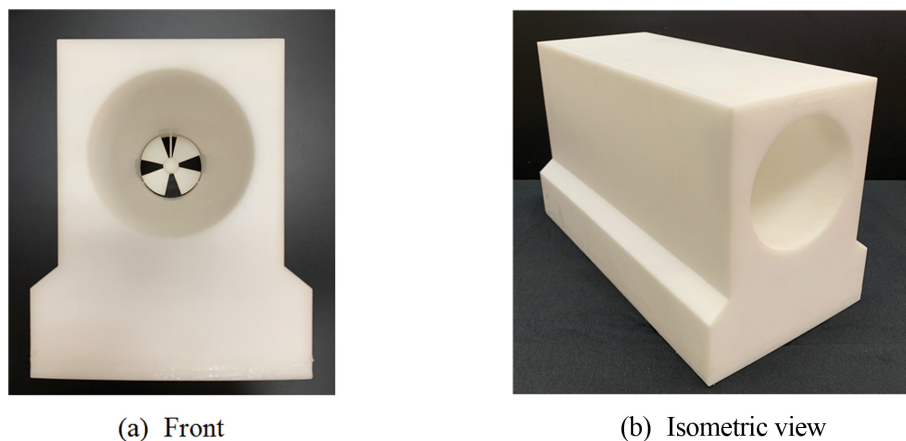


Fig. 3. Shroud tidal current power generation system.

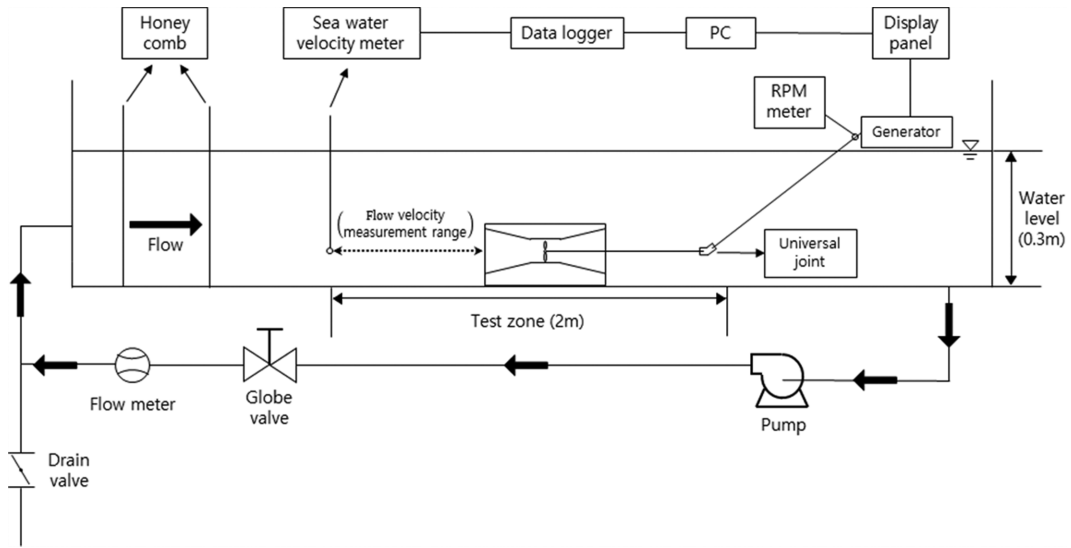


Fig. 4. Simplified flow diagram.

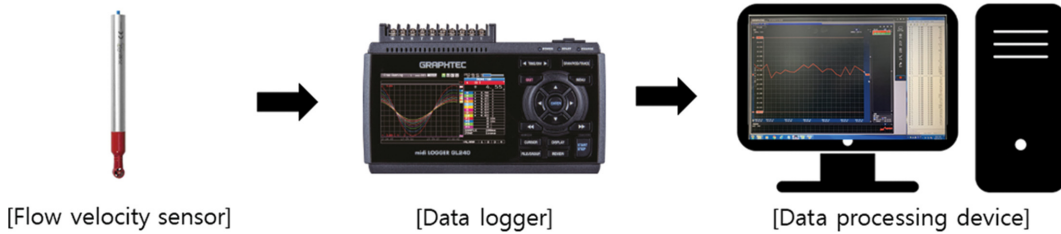


Fig. 5. Flow velocity measuring device configuration.

타입의 측정센서(Schiltknecht MiniWater 64 Micro)를 통해 유속을 측정하고, 데이터 로거(Graphtec GL240)를 이용해 시간에 따른 데이터를 샘플링, 수록하여 연결된 PC를 통해 모니터링과 분석을 수행하였다. 유속 센서의 정확도는 약 $\pm 5\%$ 이며, 데이터 로거의 경우 약 $\pm 0.1\%$ 이다. 다음 Fig. 5는 유속측정 장치 구성을 간단히 나타낸 것이다.

2.4.2 터빈의 분당 회전수 및 발전량 측정

Fig. 6(a)는 전기 부하에 따른 터빈 블레이드 회전수와 발전량 측정을 위한 장치를 나타낸 것으로 디스플레이 패널(©)

에는 회전수 측정 장치(Ⓐ), 발전기(Ⓑ), 그리고 부하모듈(Ⓓ) 등으로 연결되어 있으며, PC를 통해 시간에 따른 데이터를 표시할 수 있다. 여기서 분당 회전수는 Fig. 6(b)와 같이 발전기에 연결된 스피드 엔코더의 슬롯이 투과형 센서(포토 인터럽터) 사이를 지날 때 마다 발생된 펄스를 사용해 회전을 감지하여 측정된다. 또한 터빈으로 유입되는 유속과 블레이드의 끝 선속도의 비로 무차원한 주속비를 발전효율 변수로 사용하였다. 발전기로서 소형 모터(MB2430)를 이용했으며 여기서 생산되는 발전 전력은 디지털 멀티미터(UNI-T UT136B)를 사용하여 측정하였다. 측정 방법은 디지털 멀티미터를 부

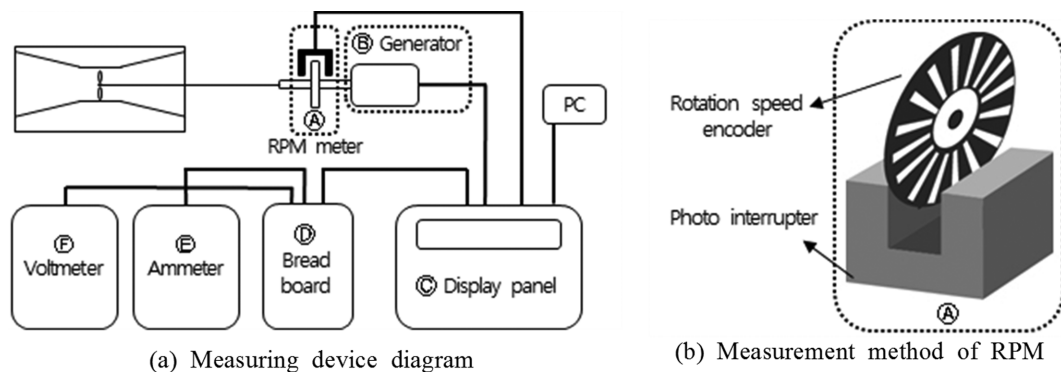


Fig. 6. Configuration of power generation measuring device.

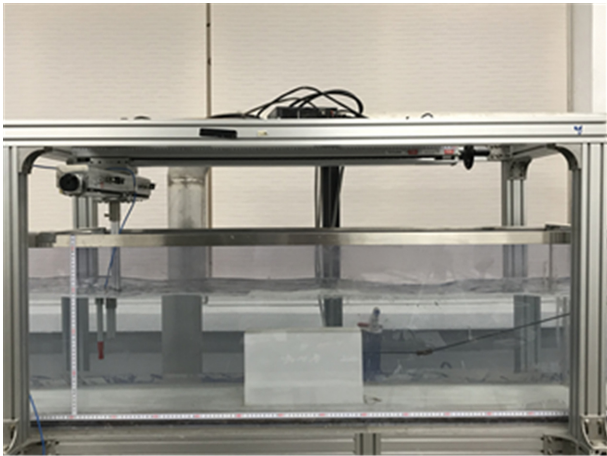


Fig. 7. Test section of circulating water tank.

하 모듈에 연결하여 캠코더를 이용해 전압과 전류에 대한 영상을 촬영 후 데이터를 기록하였으며, 전압과 전류의 측정 정확도는 약 ±0.8%, ±1.0%이다.

2.5 실험방법 및 조건

Fig. 7은 회류수조의 시험부 영역을 나타낸 그림이며 시험부 중심 바닥에 쉬라우드 조류발전장치를 위치시키고, 회전축을 이용해 터빈 블레이드와 발전기를 연결하였다. 수면 위에 위치한 발전기와 수중에 있는 터빈을 연결하기 위해서 유니버설 조인트를 사용하였으며, 회전축 간의 각도는 약 13°이다.

우리나라에서 조류발전이 적합한 해안지역의 평균 유속이 약 1~2 m/s 정도이며, 상사법칙(형상비 3:100)을 적용하여 실제 해역의 유속 범위에 따른 실험의 유속조건을 설정하였다. 이를 바탕으로 회류수조 시험부 입구에서 일정한 유속에 대한 실험을 수행하였으며(약 0.31~0.39 m/s), 전기 부하량에 따른 터빈의 분당 회전수, 전압, 그리고 전류 등을 측정하여 각 전력량을 계산하였다. 이와 함께 Fig. 8은 시험부 입구에서 측정된 유속의 시간에 따른 변화(2분)를 나타낸 것이다. 펌프의 특성상 시간에 따라 유량이 일정하지 않고 변하게 되므로 평균 약 ±9.52%의 범위 내에서 실험을 수행하였다. 각 작동 조건에서 유속별 전기 부하(저항) 19개에 대해 2분씩 측정하였고 이들의 평균값을 계산하여 데이터를 분석하였다. 여기서 저항을 달지 않으면 부하가 없는 것을 의미하며, 저항을 낮출수록 회전축을 돌지 못하도록 막는 부하가 증가하게 된다. Table 3에는 수행한 실험 조건에 대한 내용을 제시하였다.

3. 결과 및 토론

3.1 쉬라우드 전방 축 방향 유속 분포

쉬라우드 조류발전 구조체가 유동장에 미치는 영향을 분석하기 위하여 발전 구조체 중심축을 기준으로 전방 0.3 m에서 쉬라우드 입구까지 축 방향 유속을 측정하였다. Fig. 9는 실험 유속에 대한 시험부 축 방향 유속 분포를 나타낸 것이다. 전체적으로 쉬라우드 전방 0.2 m 부근까지 유속의 변화가 거의 나타나지 않으며 0.1 m부터 유속이 급격히 감소하였고 쉬

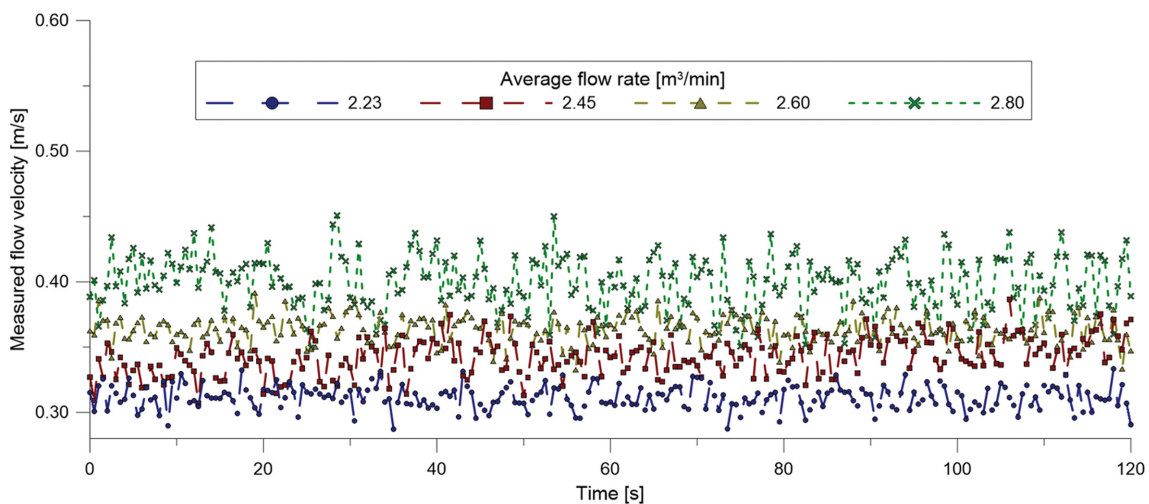


Fig. 8. Transient inlet flow velocity in front of the test section.

Table 3. Hydraulic experimental conditions

Average entrance velocity in front of test section [m/s] (flow rate [m ³ /min])	0.31 (2.23)	0.34 (2.45)	0.36 (2.60)	0.39 (2.80)
Electrical resistance [Ω]	0.2~1500			
Measurement list	Current speed, Turbine RPM, Voltage, Electric current			

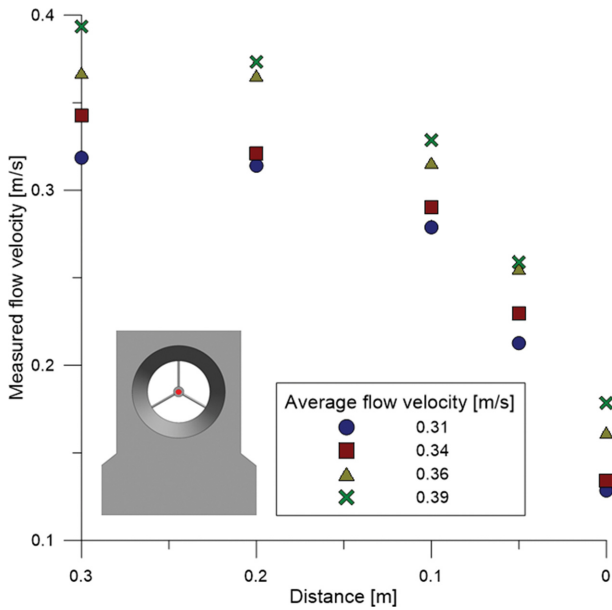


Fig. 9. Flow velocity distributions along the flow direction.

라우드 전방에서 평균 약 50% 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 유속분포는 한정된 수조 공간 내에서 쉬라우드 구조물이 저항체 역할을 하며 유속이 낮아지는 것으로 판단된다.

3.2 전기 부하에 대한 터빈 분당 회전수 변화

Fig. 10은 실험 유속에 대해 전기 부하에 따른 터빈 블레이드의 분당 회전수를 나타낸 그림이다. 저항을 이용한 전기 부하에 따라서 터빈의 분당 회전수는 약 66~261로 크게 차이를 보였다. 전체적으로 약 0.2~400 Ω까지 급격히 상승하였으며, 부하량이 감소함에 따라서 터빈 블레이드의 회전수가 평균 약 2.0배 증가하였다. 상대적으로 400 Ω 이후에는 회전수의 증가율이 낮게 나타나며 거의 일정하게 유지된다.

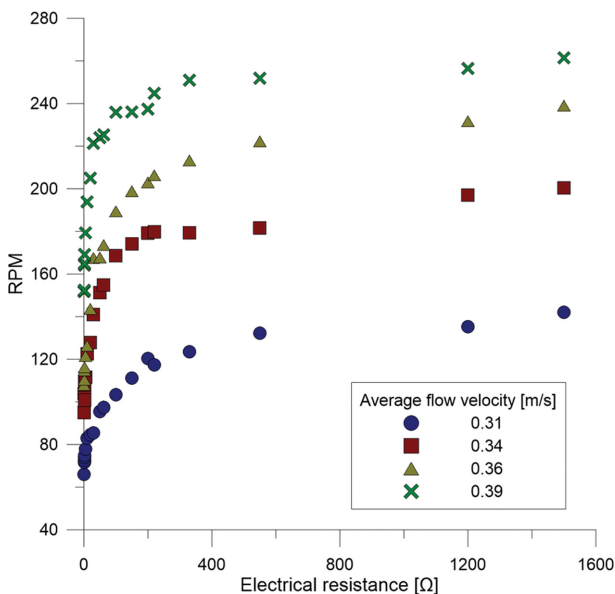


Fig. 10. Effect of electrical resistance on turbine rotational velocity.

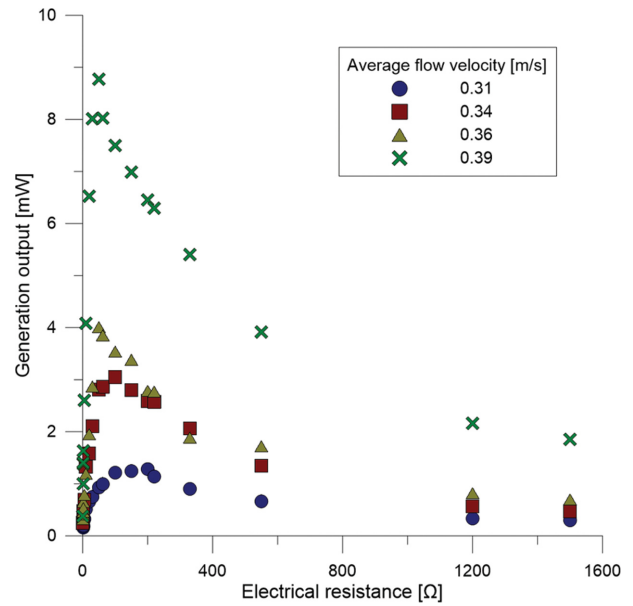


Fig. 11. Generation output variation.

3.3 전기 부하에 따른 전력 변화

전기 부하량에 따른 발전 출력을 Fig. 11에 나타내었다. 각 점은 실험 유속과 전기저항에 대하여 캠코더를 이용해 2분간 기록한 전압과 전류의 곱을 발전 출력으로 표시한 것이다. Fig. 10에서는 부하량의 감소와 함께 터빈의 회전수가 증가하지만 전력의 경우는 특정 구간에서 최대 전력 지점을 나타낸 후 낮아지는 경향을 보였다. 전체적으로 최대 전력 지점은 약 50~150 Ω 구간에서 나타났으며, 유속이 높아짐에 따라 큰 전기 부하에서 최대 전력이 발생하는 경향이 나타났다. 해수의 유속이 증가함에 따라 평균 약 2.0배씩 증가하였으며, 시험부 입구유속 0.36 m/s에서 0.39 m/s로 유속이 빨라졌을 때 가장 높은 전력 증가율이 나타났다. 또한 가장 낮은 유속과 가장 높은 실험 유속에서 최대 전력은 약 7.05배 차이가 나타났다. 약 400 Ω 이상의 저항은 실험에 사용된 발전기(소형 모터)의 전기 부하에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타나며 발전 출력도 낮아지게 된다.

3.4 터빈 주속비 변화에 대한 효율 특성 분석

Fig. 12는 측정된 터빈의 분당 회전수에 따른 발전 효율을 나타낸 그림이며, 회전수는 다음 식(2)과 같이 주속비로 무차원화하여 표현된다. 유속, 터빈의 직경, 회전속도 등 많은 변수들에 의해 터빈의 출력 특성은 달라지나 출력특성을 주속비에 대해 표현하면 다양한 터빈들의 성능을 비교할 수 있다 (Jo et al., 2012).

$$\lambda(\text{Tip speed ratio}) = \frac{w_t \cdot R}{U_\infty} \tag{2}$$

여기서, U_∞ [m/s]는 시험부 입구 유속, w_t [rad/s]와 R [m]은 터빈 블레이드의 각속도와 반경이다. 발전 효율은 다음 식(3)

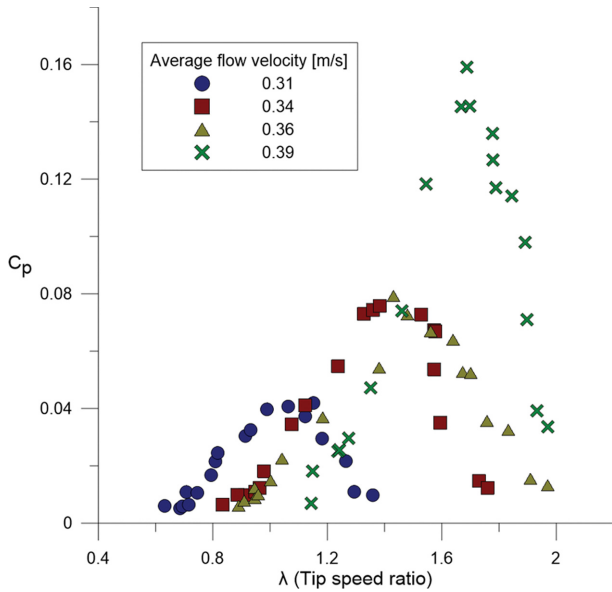


Fig. 12. Power efficiency variation with turbine blade tip speed ratio.

과 같이 유체의 운동에너지와 전기적 출력의 비로 표현된다.

$$C_p = \frac{V \cdot I}{\frac{1}{2} \rho A_c U^3} \quad (3)$$

여기서, ρ [kg/m³]와 U [m/s]는 유체의 밀도와 평균 속도, A_c [m²]는 쉬라우드 입구의 단면적이며 V [V]와 I [A]는 발전기에서 측정된 전압과 전류이다. 전체적으로 효율은 터빈의 주속비 증가와 함께 상승하다가 최대 효율 지점을 나타낸 후 낮아지는 특성을 볼 수 있다. 시험부 입구 유속 조건별 최고 효율은 각각 주속비 약 1.15일 때 약 4.19%, 주속비 1.38에 7.58%, 주속비 1.43에 7.92%, 주속비 1.68에 15.90%로 나타난다. 평균 유속이 0.34 m/s에서 0.36 m/s로 증가할 때 가장 낮은 효율 증가율이 나타난 반면 0.36 m/s에서 0.39 m/s로 증가할 때 주속비와 효율이 급격히 증가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 쉬라우드 내부형상을 수반한 조류발전장치의 축소모형실험을 통해 시험 유속과 전기 부하의 변화에 따른 터빈 블레이드의 분당 회전수와 발전기의 출력을 측정하여 발전 성능을 분석하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 시험부 입구에서 쉬라우드 전방으로 근접할수록 유속이 감소하였으며, 일정한 유속에서 전기 부하량이 감소함과 동시에 터빈의 분당 회전수가 함께 증가하였다.
2. 발전기에서 측정된 최대 전력 지점은 유속 별로 저항을 이용한 전기 부하가 약 50~150 Ω 구간에서 나타났으며, 높은 유속일수록 상대적으로 큰 부하에서 최대전력이 생산된다.

실험 유속이 높아짐에 따라 전압은 평균 약 1.20배, 전류는 약 1.74배 증가하여 전압보다 전류의 상승률이 높게 나타났으며 따라서 전력이 크게 증가하였다.

3. 유속의 증가와 함께 터빈 블레이드의 주속비가 증가하였고 이에 따라 발전 효율은 약 4.2%에서 15.9%까지 증가하였다.

본 연구의 결과는 자중고정식 쉬라우드 조류발전장치의 개발에 필요한 기초적인 설계데이터로 활용이 가능할 것으로 기대되며 추후 전산해석을 통한 기계적-전기적 효율 분석이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국해양과학기술진흥원 미래해양산업기술개발 해양중소벤처지원사업인 “코크리트 쉬라우드를 이용한 조류발전 시스템 연구(과제 번호: 20170122)”의 지원으로 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

References

Fleming, C.F. and Willden, R.H. (2016). Analysis of bi-directional ducted tidal turbine performance. *International Journal of Marine Energy*, 16, 162-173.

Jo, C.H., Lee, K.H., Yim, J.Y. and Chae, K.S. (2009). Performance evaluation of TCP device with upstream duct installation. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 77-80 (in Korean).

Jo, C.H., Rho, Y.H. and Lee, K.H. (2012). HAT tidal current turbine design and performance test with variable loads. *Journal of The Korean Society for New and Renewable Energy*, 8(1), 44-51 (in Korean).

Kim, J.W. and Lee, S.H. (2012). A study on seawater flow characteristics inside the shrouds used in tidal current generation systems for various geometric angles under constant tidal current velocity. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 24(2), 77-83 (in Korean).

Lee, J.K. and Hyun, B.S. (2016). Study on performance variation according to the arrangements of adjacent vertical-axis turbines for tidal current energy conversion. *Journal of the Korean Society for Marine Environment and Energy*, 19(2), 151-158 (in Korean).

Lee, N.J., Kim, I.C., Kim, C.G., Hyun, B.S. and Lee, Y.H. (2015). Performance study on a counter-rotating tidal current turbine by CFD and model experimentation. *Renewable Energy*, 79, 122-126.

Lee, U.J., Han, S.J., Jeong, S.T. and Lee, S.H. (2019). Analysis of flow velocity change in blade installed shroud system for tidal current generation. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, 31(1), 9-16 (in Korean).

Lee, U.J., Lee, S.H., Han, S.J., Jeong, S.T., Choi, H.J. and Ko, D.H. (2018). Numerical analysis for the optimum design of shroud

tidal stream generation system. Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 30(3), 134-141 (in Korean).
Solidworks User'Manual, 2018, Dassault System.
Tian, W., Mao, Z. and Ding, H. (2018). Design, test and numerical simulation of a low-speed horizontal axis hydrokinetic turbine. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engi-

neering, 10(6), 782-793.

Received 23 July, 2019

Revised 22 August, 2019

Accepted 22 August, 2019