

자유수면에서 블레이드 수 변화가 마이크로 중력식 와류 수차 성능에 미치는 영향

김종우**·최인호*·정기수**

*서울대학교 건설시스템공학과

**한국생산기술연구원

Effect of Blade Number Variations on Performance of Micro Gravitational Vortex Turbine in Free Water Surface

Jong-Woo Kim**·In-Ho Choi*·Gi-Soo Chung**

*Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea

**Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

(Received : 5 July 2023, Revised : 26 July 2023, Accepted : 2 August 2023)

요약

본 연구는 자유수면 아래 원통형 와류발생부에서 와류 수차 성능에 대한 블레이드 수가 미치는 영향을 이해하는 것이 다. 동일한 블레이드 형상을 사용하여 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.065 ~ 0.417 범위에 설치된 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개의 블레이드로 마이크로 와류 수차의 성능을 실험하였다. 연구 결과로서 블레이드 수가 증가함에 따라 회전수, 전압, 전류 및 출력이 유속 0.7 m/s 이하일 때 상대 와류 수심비 0.065와 0.111 지점에서 증가한다. 5개 블레이드 수차의 평균 출력은 다른 블레이드 수보다 높게 나타난다. 오리피스 근처에 설치된 직경 130 mm인 4개의 블레이드 수차의 성능이 와류발생부에서 동일한 수의 직경 220 mm인 블레이드 수차보다 높다.

핵심용어 : 원통형 와류발생부, 자유수면, 블레이드 수, 와류 수차

Abstract

The aim of this paper is to understand the blade number effect on vortex turbine performance in the cylindrical vortex chamber below the free water surface. Using the same blade profile, the performance of gravitational vortex turbine is tested each with 2, 3, 4, 5 and 6 blades installed at the relative vortex height (y/h_v) ranging from 0.065 to 0.417. The obtained results indicate that the rotation, voltage, current and power increase in the relative vortex height of 0.065 and 0.111 when increasing the number of blades at flow velocity of less than 0.7 m/s. The average power of the 5-blade turbine is more than others. The performance of the 4-blade turbine with a 130 mm diameter installed near the orifice is higher than that of the same number of blades with a 220 mm diameter in the vortex chamber.

Key words : Cylindrical vortex chamber, Free water surface, Blade number, Vortex turbine

*To whom correspondence should be addressed.

Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea
E-mail: jwkim@seoul.ac.kr

• Jong-Woo Kim Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea/Assistant Professor(jwkim@seoul.ac.kr)
• In-Ho Choi Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea/Professor(cih@seoul.ac.kr)
• Gi-Soo Chung Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)/Principal Researcher(gschung@kitech.re.kr)

1. 서 론

자유수면 와류는 수처리 및 배수처리를 원활히 하는 흐름 제어 그리고 산소농도를 증가시켜 유수를 정화시키는 와류 시스템 등에 광범위하게 적용된다. 흐르는 유체상태에서 와류를 사용하여 에너지를 생성한다(Zotlöterer, 2004). 와류 시스템은 일반적으로 설계가 간단하고 유수를 원활하게 배출할 수 있는 홍수저감장치로 사용할 뿐만 아니라 에너지 생성에 적용할 경우 다른 유형의 대규모 구조물이 필요한 수력발전보다 경제적이다. 마이크로 와류 수차는 대형방조제 건설로 인해 갯벌과 습지 파괴 등 연안환경과 해양 생물 다양성에 영향을 주는 조력발전과 달리 환경 친화적이며 경제적이다. 와류발전은 와류에 의해 공기 유입에 따른 산소 용존율을 높여 수환경을 개선하고, 어류를 안전하게 하류로 통과시킨다. 와류 수차는 저낙차와 저유량에서 효율적 이어서 양식장, 해양심층수 배출수, 하천, 저수지, 다목적댐 용수로, 하수처리장 및 정수장 등에 사용하기에 적합하다.

국외에서는 자유수면에서 와류 수차의 성능에 영향을 주는 물리적 매개변수의 영향에 대한 수리실험과 수치해석에 관한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. Drioli (1947)는 최초로 수공구조물 내 와류 드롭 사프트를 소개했으며, 와류개념을 수리공학에 도입하였다. Drioli (1969)는 와류식 소용돌이형(scroll intake) 유입부의 개념을 제시하였다. 와류발생부 중앙의 유출구는 강한 와류를 발생시킨다. 와류강도(vortex strength)는 에어코어의 거동, 오리피스 직경 및 마찰손실 등에 영향을 받는다(Mulligan, 2015). 와류강도는 중앙 에어코어의 형성과 함께 와류발생부의 오리피스 직경 비율에 크게 의존한다(Chattha et al., 2017). 나선형 유체흐름은 회전을 유속을 증가시킨다(Mulligan, 2015). 강한 와류가 발생하는 수공구조물은 높은 레이놀즈 수를 가지며, 와류는 난류의 영향을 받는다(Mulligan et al., 2016). Mulligan et al. (2018)은 기하학적 매개변수와 입구부 흐름조건의 영향을 광범위하게 조사했다. 많은 학자들이 유동해석(CFD)으로 와류거동과 와류본체의 흐름을 분석하였다(Li et al., 2008; Shabara et al., 2015; Mulligan, 2015; Nishi and Inagaki, 2017; Zhang and Wang, 2019; Wardhana et al., 2019). 와류 현상에서 에어 코어의 반경은 자유 표면에서 유출구 지점 오리피스로 갈수록 점차 감소한다(Li et al., 2008). Zotlöterer (2004)는 원통형 와류발생부의 구조적 형태를 제시하였다. Dhakal et al. (2015)은 동일한 낙차와 유량조건에서 원추형(conical basin) 와류발생부가 원통형(cylindrical basin)보다 효율성이 크다고 비교분석하였다. 지금까지 기존 연구는 와류발생부에서 수차효율을 연구하였다. Power et al. (2016)은 와류발생부에서 중력식 와류수차(gravitational water vortex turbine)에 대한 다양한 조건(블레이드 크기, 블레이드 수(2엽과 4엽), 와류높이 등)에 따라 수차효율에 대한 실험연구를 하였다. Ullah et al. (2020)는 원추형 와류발생부에서 단일 블레이드와 다중 블레이드의 발전성능(토크, 회전수,

효율 및 출력량)에 관한 연구를 하였다. 마이크로 소수력 시스템 중에서 와류를 이용한 수차기술을 상용화했다(Kouris, 2000; Turbulent, 2020; Zotlöterer, 2004).

국내에서는 와류 수차에 대한 기초적인 연구만 진행되고 있다. Choi et al. (2020)은 원통형 와류발생부의 유출구 직경 비율을 17 - 18.5 % 범위로 제안했다. 곡선형 블레이드의 효율이 높다고 제시하였다. Kim et al. (2021)은 유동해석(CFD)을 이용하여 와류발생부에서 원추형 와류 수차 성능에 블레이드 수의 영향을 연구하였다. 폴리비가 와류 수차의 성능에 영향을 준다는 사실을 증명하였다(Choi et al., 2021). Choi et al. (2022)은 자유수면에서 동일한 크기와 형상으로 제작한 블레이드의 상대위치 변화에 따른 효율과 출력을 연구하였으며, 와류발생부보다 오리피스 입구에서 와류강도가 높다는 사실을 제시하였다. 하지만 오리피스 입구에서 블레이드 수 변화에 따른 와류 수차의 성능에 관한 기술적인 연구는 미흡한 상태이다.

본 논문은 러너 블레이드 수 변화가 원통형 와류 수차의 성능에 미치는 영향을 연구하였다. 동일한 형상으로 제작한 러너 블레이드를 와류발생부에서 실험한 기존의 연구와 달리 와류세기가 달라지는 오리피스 입구근처에 설치하였다. 동일한 실험 조건하에 각각 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개의 블레이드 변화에 따라 와류 수차의 회전수, 접선방향의 유속, 와류수심, 전압, 전류, 와류출력을 측정해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 와류 수차

중력식 와류 수차의 개략도는 Fig. 1과 같다. 와류발생장치는 유입부, 원통형 와류발생부, 유동면적이 조절되는 오리피스 유출부 및 러너 블레이드로 구성하였다. 와류 발전 장치의 우측에 유체가 유입되어 러너 블레이드를 구동시키고 하부 오리피스를 통해서 배출되는 구조이다. 와류발전 장치의 외부직경(D_a), 내부직경(D_i) 및 유출구 높이(H)는 각각 580 mm, 470 mm, 575 mm이다(Choi et al., 2021). 개수로와 연결된 와류발생부의 입구 폭은 160 mm이며, 와류발생부의 높이는 300 mm이다(Choi et al., 2022). 하부 오리피스의 지름(D_o)은 134 mm이다. 중력식 와류 발전 장치와 연결된 개수로의 폭은 160 mm, 높이는 300 mm, 길이는 1500 mm이다.

와류수차의 유효낙차(H_e)는 Bernoulli 정리를 적용하면 식(1)과 같이 나타낸다.

$$H_e = \left(\frac{v_1^2}{2g} - \frac{v_2^2}{2g} \right) + (h_1 - h_2) + \Delta h \quad (1)$$

여기서, H_e 는 유효낙차(m), v_1 은 상류단 유속, h_1 은 상류단 수심, Δh 는 하류단 하상으로부터 상류단 하상까지 높이(m), v_2 는 하류단의 유속, h_2 는 하류단의 수심이다.

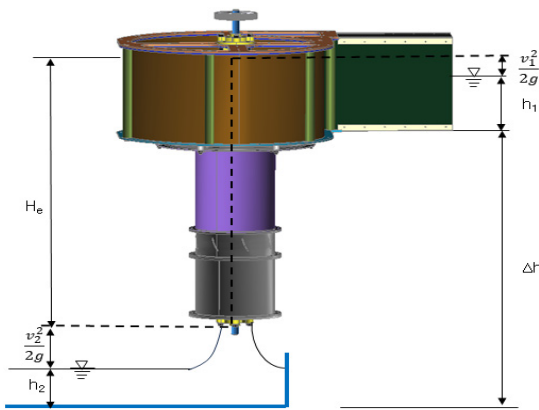


Fig. 1. Energy diagram for vortex turbine with cylindrical basin.

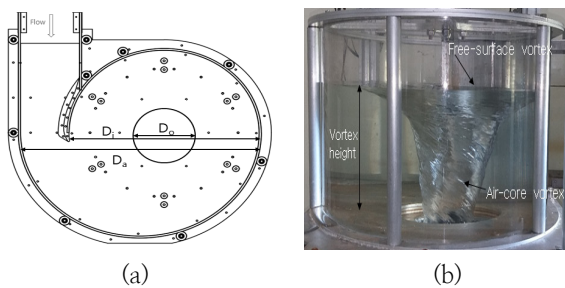


Fig. 2. (a) Schematic diagram of vortex chamber and (b) strong vortex flow (Choi et al., 2022).

일반적으로 이론수력은 유효낙차를 고려할 때 식(2)와 같이 정의한다.

$$P_{in} = \rho g Q H_e \quad (2)$$

여기서, ρ 는 유체 밀도(kg/m^3), g 는 중력가속도(m/s^2), Q 는 유량(m^3/s)이다.

Fig. 2는 와류발생부의 외부직경(D_o), 내부직경(D_i), 오리피스 지름(D_o), 자유수면 와류(free-surface vortex) 및 에어코어(air-core)를 보여준다. 유입된 유량은 와류발생부에서 자유수면 와류 및 에어코어를 형성하고 유동함에 따라 매우 강한 와류가 발생한다(Choi et al., 2022). 강한 와류는 회전부의 러너 블레이드에 가해지고 유체의 항력으로 중력식 와류 수차의 발전효율을 높일 수 있다. 와류 세기는 유입 유량과 오리피스 유출 면적 사이의 상관관계에 따라 달라질 수

있다(Choi et al., 2020).

발전기 출력(P_{out})은 전압(V)과 전류(I)의 곱으로 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$P_{out} = V \cdot I \quad (3)$$

와류수차 효율(η)은 식 (4)와 같이 표현한다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (4)$$

2.2 실험조건과 장치

실험은 상대 직경비(D_o/D_a) 0.231에서 효율이 좋은 곡선형 블레이드 수 변화에 따라 수행하였다. Fig. 2와 같이 D_a 는 와류발생부의 외부직경이며, D_o 는 오리피스의 지름이다. Fig. 3은 각각 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개의 블레이드(2엽, 3엽, 4엽, 5엽, 6엽)를 나타낸다. 러너 블레이드의 형상, 직경 및 높이는 동일하며 2엽에서 6엽까지 증가시키며 등간격으로 배치했다. 블레이드의 직경, 높이 및 두께는 각각 130 mm, 80 mm 및 15 mm이다.

Fig. 4와 같이 와류발생부 우측에서 유체가 유입되어 회전 중심축에 설치된 러너 블레이드를 구동시키고 하부 오리피스를 통해서 배출되는 구조이다. 회전중심축(샤프트)과 연결된 러너 블레이드에 와류 회전력이 전달된다. 회전중심축의 상부 구동풀리가 회전하면서 벨트로 결합된 발전기를 회전시켜 전기에너지를 발생시킨다. 발전장치는 와류발생부 상단에 설치하였다. 설치된 발전기는 선앤윈드 에너지사에서 개발한 300 W 하드아노다이징 알루미늄 발전기(Hard Anodizing Aluminum Generator)이다. 곡률형태로 이루어진 와류 발생부에서 발생한 와류는 러너 블레이드를 돌려 풀리와 회전축에 회전력을 전달한다. 3상 브리지다이오드(MDS50-16)는 발전기에서 발생된 교류(AC)를 직류(DC)로 바꿔준다. 전압과 전류는 디지털 멀티미터(디지털 후크메타 3280-10과 AC/DC 클램프 미터)로 측정하였다. 부하전류는 LED램프(각 10W, 220V)를 직렬로 결선하여 분석하였다. 와류 발생부 유입유량은 블레이드를 설치하지 않은 조건에서 $0.0076 \text{ m}^3/\text{s}$ 이다. 직경비(D_o/D_a)는 0.231, 와류 높이(h_v)는 18.5 cm, 상부 표면에서 와류직경은 24.3 cm이다.

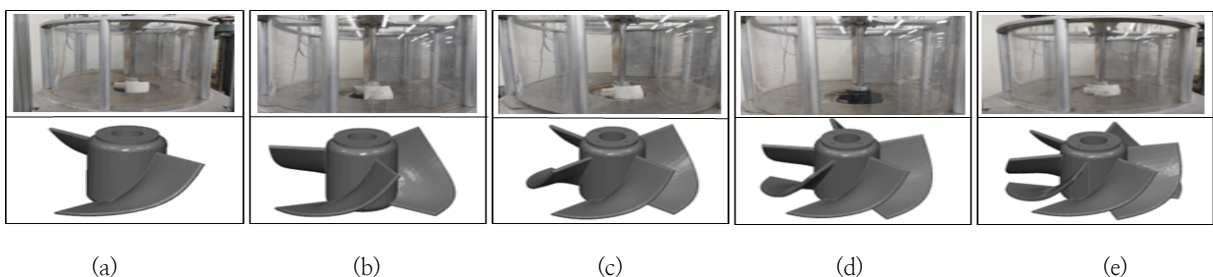


Fig. 3. 3D schematic drawing of vortex runner with (a) 2 blades, (b) 3 blades, (c) 4 blades, (d) 5 blades and (e) 6 blades.

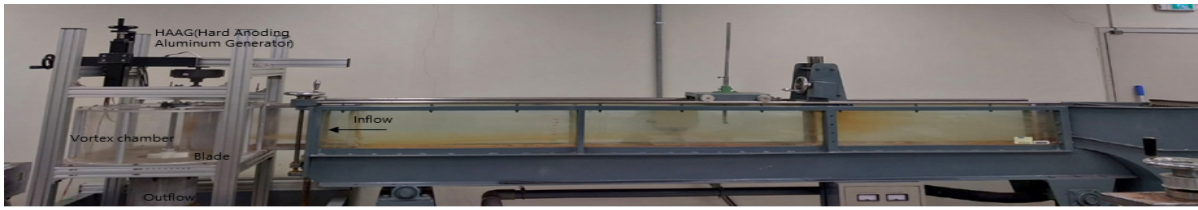


Fig. 4. Experimental setup for vortex turbine with permanent magnet generator.

3. 실험결과

3.1 와류발생부에서 회전수와 와류 높이

Fig. 5는 상대 직경비(D_o/D_a) 0.231에서 블레이드 수와 상대위치 변화에 따른 회전수를 보여준다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 회전수 변화 패턴은 비슷하며, 블레이드 수에 영향을 받는다. 회전수는 블레이드 수가 증가함에 따라 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.222 지점이하에서 증가하는 것을 볼 수 있다. 회전수는 5개의 블레이드까지 상대 와류 수심비 0.417 지점을 제외하고 증가하였다. 회전수의 증가폭이 블레이드에 대한 수리저항 때문에 2개, 3개 및 4개의 블레이드보다 5개와 6개의 블레이드 사이에서 감소하였다. 6개의 블레이드에서 회전수는 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.111 이후부터 급격히 감소하였다. 평균 회전수는 5개의 블레이드에서 가장 높게 나타난다.

Fig. 6은 와류발생부에서 러너 블레이드의 상대 위치를 나타낸다. 블레이드의 상대 와류 수심비(y/h_v)는 연직방향

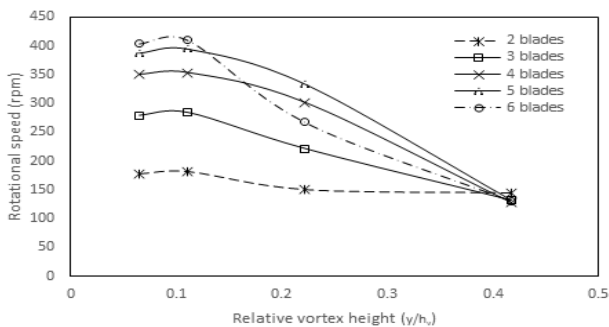


Fig. 5. Relation rotational speed and relative vortex height with increasing number of blades.

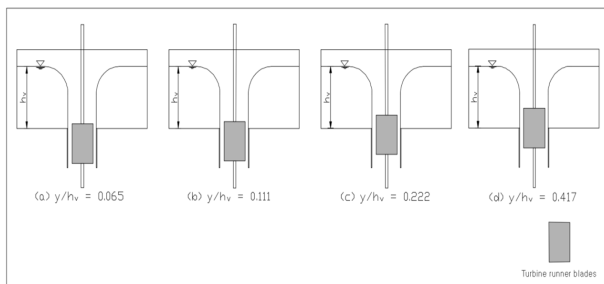


Fig. 6. Relative position of turbine runner blades in vortex chamber.

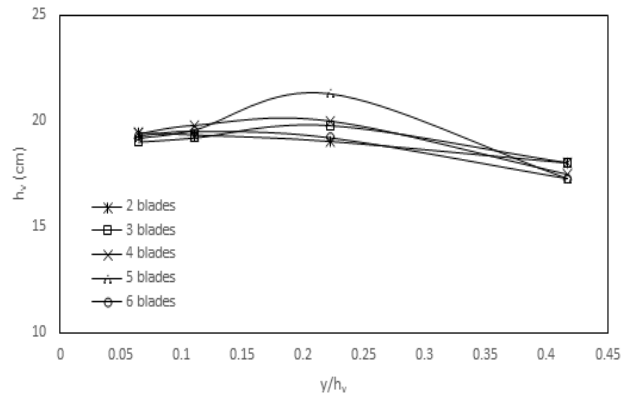


Fig. 7. Relation vortex height and relative vortex height with increasing number of blades.

으로 4개 지점이다. 수차 러너 블레이드는 접선방향 유속을 고려하여 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.065, 0.111, 0.222, 0.417 지점에 설치하였다. y 는 와류 발생부의 바닥으로부터 수심이며, h_v 는 와류 높이를 뜻한다. 물리적 매개변수(회전수, 와류 높이)는 오리피스 입구근처 4개 지점에서 블레이드 수를 변화시키면서 측정하였다.

Fig. 7은 블레이드 수와 상대 와류 수심비(y/h_v) 변화에 따른 와류 높이(h_v)를 나타낸다. 와류 높이는 17 ~ 21.5 cm 범위이며, 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.222 지점에서 상대적으로 높게 나타난다. 평균 와류 높이는 5개의 블레이드(5엽)까지 증가하다가 감소하였으며, 평균 와류 높이는 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개의 블레이드에서 각각 18.9 cm, 19 cm, 19.17 cm, 19.35 cm 및 18.82 cm이다. 와류 수차의 성능에 영향을 주는 평균 와류 높이는 5개의 블레이드에서 가장 높게 나타난다.

3.2 수차 러너 블레이드의 전압과 전류

Fig. 8은 상대 와류 수심비와 블레이드 수 변화에 따른 전압을 보여준다. 블레이드의 상대 와류 수심비(y/h_v)는 연직방향으로 4개 지점이다. Fig. 6과 같이 영구자석발전기에서 발생된 전압은 오리피스 근처 지점에서 와류발생부 중간 지점까지 블레이드 위치를 변화시키면서 측정하였다. Fig. 8과 같이 부하 조건에서 전압은 상대 와류 수심비 0.417 지점에서 3개의 블레이드를 제외하고 일정하였다. 전압 증가폭은 5개의 블레이드(5엽)부터 감소하였다. 이와 같은 결과는 블레이드

에 에너지를 전달한 후에 블레이드 수가 증가하면서 유동이 교란되고 교란된 유동이 바로 러너 블레이드의 성능을 감소시키는 요인으로 작용하기 때문이다. 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.222 지점에서 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하였다. 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개 블레이드의 평균 전압은 각각 35 V, 47 V, 61 V, 67 V 및 64 V이다. 와류 수차 성능에 영향을 끼치는 평균 전압은 5개의 블레이드(5엽)에서 가장 높게 나타난다.

Fig. 9는 동일한 실험조건에서 측정한 전류를 나타낸다. 블레이드의 상대 와류 수심비(y/h_v)는 연직방향으로 4개 지점이다. 전류는 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 다른 지점보다 약간 높게 나타남을 볼 수 있다. 전류는 상대 와류 수심비(y/h_v)가 증가할수록 블레이드 수 조건에 상관없이 감소하며, 오리피스 입구에 근접할수록 증가한다. 이와 같은 현상은 상대 와류 수심비가 증가할수록 에어코어의 폭이 증가하여 러너 블레이드에 대한 와류유체의 충격력이 감소하기 때문인 것으로 판단된다. 평균 전류는 상대 와류 수심비의 범위 0.065 ~ 0.25 지점에서 2개, 3개, 4개 및 6개의 블레이드보다 5개의 블레이드에서 높게 나타난다. 수리저항(hydraulic resistance)이 6개의 블레이드(6엽)부터 부적절한 유체충격에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

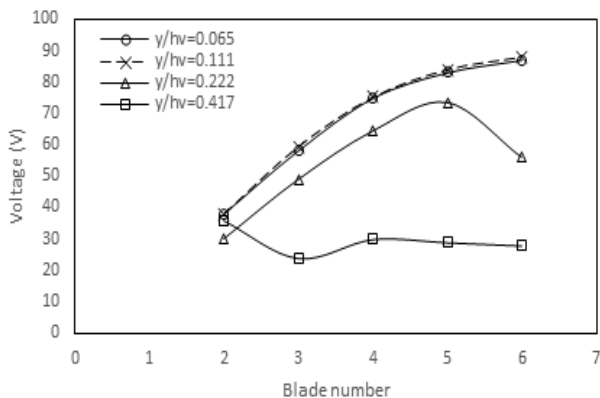


Fig. 8. Relation voltage and relative vortex height with increasing number of blades.

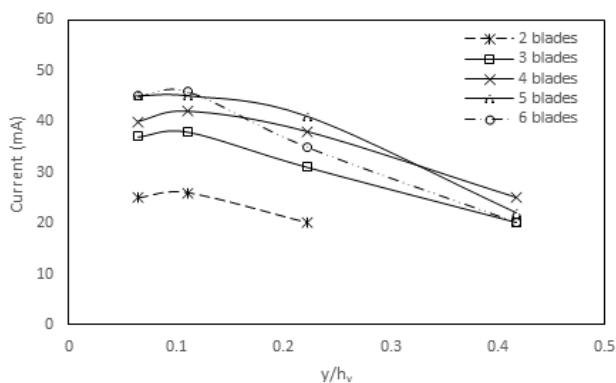


Fig. 9. Relation current and relative vortex height with increasing number of blades.

3.3 와류 수차의 출력

Fig. 10은 상대 반경비(r/r_o) 1.49 지점에서 블레이드 수의 변화에 따른 접선방향의 유속 변화를 보여준다. r 은 중심축으로부터 수평방향 반경이며, r_o 는 오리피스 반경이다. 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개의 블레이드에 대한 평균 접선방향의 유속은 각각 57.4 cm/s, 58.8 cm/s, 62.7 cm/s, 66.1 cm/s 및 63.5 cm/s이다. 평균 접선방향의 유속은 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하였다.

Fig. 11은 상대 반경비(r/r_o) 1.49 지점에서 와류발생부의 수평방향의 순환매개변수(Γ) 변화를 보여준다. Rankine (1858)이 제시한 식에 의해 순환매개변수를 산정하였다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 순환매개변수의 패턴은 비슷하지만 블레이드 수는 와류강도를 나타내는 순환매개변수에 영향을 미친다. 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개 블레이드의 평균 순환매개변수는 각각 0.366 m²/s, 0.369 m²/s, 0.394 m²/s, 0.415 m²/s 및 0.399 m²/s이다. 순환매개변수는 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하는 현상을 볼 수 있다.

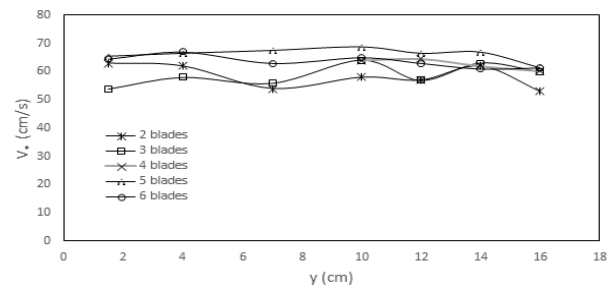


Fig. 10. Tangential velocity for $r/r_o = 1.49$ in vortex chamber.

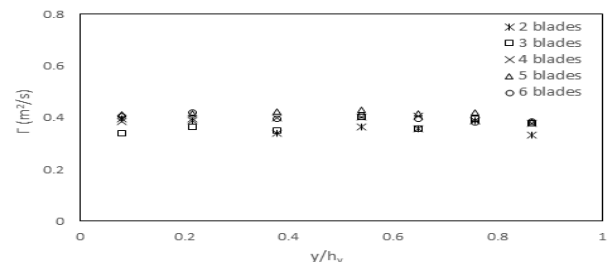


Fig. 11. Circulation Γ for $r/r_o = 1.49$ in vortex chamber.

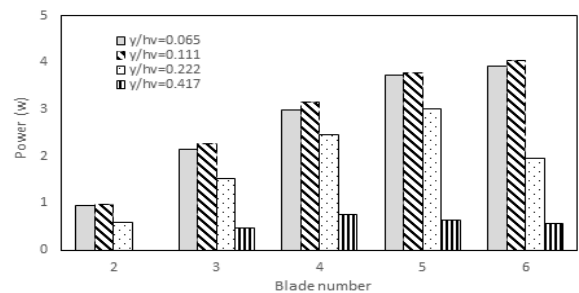


Fig. 12. Power of vortex turbine at the relative vortex height ranging from 0.065 to 0.417 with increasing number of blades.

Table 1. Voltage, current, power and efficiency at the relative vortex height of 0.111 with increasing the number of blades

Blade number	y/h_v	Voltage (V)	Current (mA)	P_{out} (W)	v_1 (m/s)	v_2 (m/s)	Q (m^3/s)	H_e (m)	P_{in} (W)	η (%)
2	0.111	38.0	26	0.988	0.216	0.65	0.00727	0.680	48.45	2.04
3	0.111	59.5	38	2.261	0.216	0.69	0.00746	0.686	50.15	4.51
4	0.111	75.2	42	3.158	0.211	0.66	0.00708	0.682	47.31	6.68
5	0.111	84.0	45	3.780	0.211	0.68	0.00709	0.681	47.31	7.99
6	0.111	88.0	46	4.048	0.209	0.66	0.00701	0.682	46.85	8.64

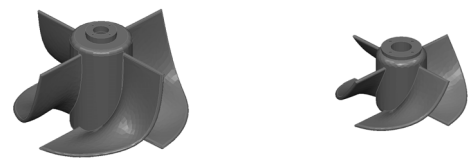
Fig. 12는 상대 직경비(D_o/D_a) 0.231에서 블레이드 수 증가에 따른 출력을 나타낸다. 와류 수차의 출력은 상대 와류 수심비 0.065, 0.111, 0.222 및 0.417 지점에서 영구자석발전기의 전압과 전류를 통해 측정하였다. 출력은 블레이드의 수와 상대위치변화에 따라 변화하였다. 상대 와류 수심비 0.065와 0.111 지점에서 출력은 블레이드 수 증가에 따라 증가한 반면 수심비 0.222와 0.417 지점에서 증가하다가 감소하였다. 출력은 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 가장 높았으며 2개, 3개, 4개, 5개 및 6개 블레이드의 출력은 각각 0.98 W, 2.26 W, 3.15 W, 3.78 W 및 4.04 W이다. 출력 증가폭은 블레이드 수가 증가할수록 감소함을 나타낸다. 상대 와류 수심비 0.222 지점에서 출력은 5개 블레이드까지 증가하다가 감소하였다. 전체적으로 발전량이 낮은 이유는 상대 직경비 0.231이 Choi et al. (2020)에 의해 제시된 효율적인 직경비 0.17 ~ 0.185 범위를 벗어났기 때문이라고 판단된다.

Table 1은 블레이드 수 변화에 따른 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 와류출력과 발전효율을 나타낸다. 효율은 2.0 ~ 8.7 % 범위이다. 이론 출력(P_m)의 범위는 46 ~ 51 W이며, 발전기의 출력(P_{out})은 0.9 ~ 4.1 W 범위를 나타낸다. 효율은 블레이드의 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 블레이드

드 수가 증가할수록 증가하였다. 와류 수차의 효율은 블레이드의 상대위치뿐만 아니라 블레이드 수에 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다. 효율은 상대 와류 수심비 0.222 지점에서 5개의 블레이드보다 6개의 블레이드에서 수리저항이 증가하기 때문에 감소하는 것으로 판단된다.

3.4 와류유동에 따른 블레이드 러너의 크기의 영향

본 연구는 와류수차 성능에 블레이드 크기의 영향을 분석하였다. 동일한 형상이지만 지름과 높이가 다른 두 개의 4엽 블레이드를 설계 및 제작하였다. 와류발생부 내에 설치한 블레이드의 지름과 높이는 각각 220 mm와 150 mm이며, 오리피스 근처에 설치한 블레이드의 지름과 높이는 각각 130 mm와 80 mm이다(Fig. 13).



(a) D = 220 mm, H = 150 mm (b) D = 130 mm, H = 80 mm

Fig. 13. 3D schematic drawing of 4-blade turbine with different diameter (D) and height (H).

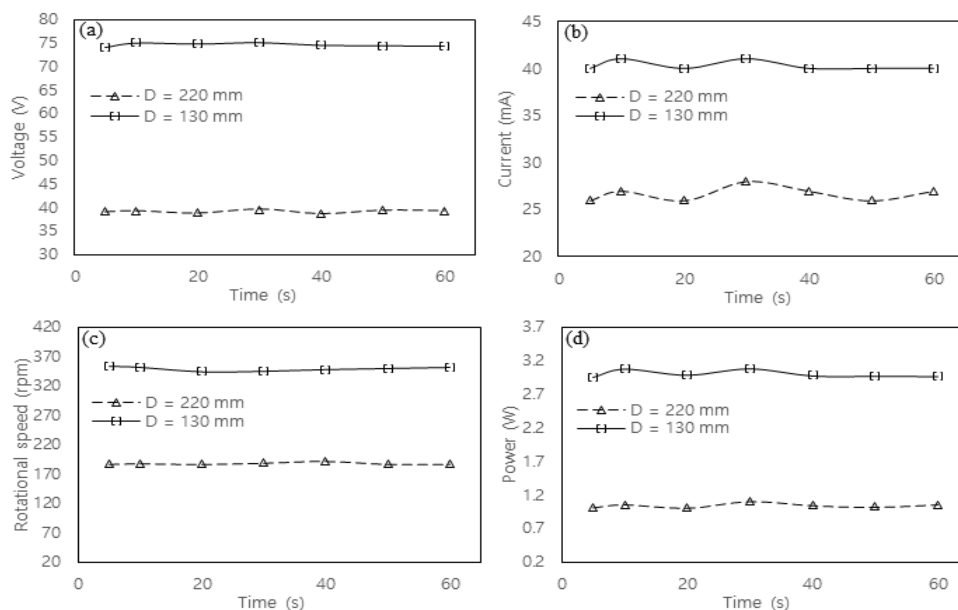


Fig. 14. (a) Voltage, (b) current, (c) rotational speed and (d) power of 4-blade turbine.

Fig. 14에서 나타낸바와 같이 동일한 유입유량 조건에서 회전수, 전류, 전압 및 출력은 와류발생부 내에 설치한 블레이드보다 오리피스 근처에 설치된 블레이드가 높게 나타난다. 블레이드 크기 차이가 있음에도 불구하고 강한 와류 유동이 와류발생부보다 단면변화가 시작되는 오리피스 근처 지점에서 발생한다. 이런 경향은 오리피스와 같은 좁은 출구로 유출될 때 유속이 증가하기 때문이라 판단된다. 와류유동의 세기에 따라 회전수, 전압, 전류 및 출력은 와류발생부보다 단면적이 감소하는 오리피스 근처 지점에서 각각 1.9배, 1.8배, 1.4배 및 2.8배 이상 증가하였다.

4. 결 론

본 연구는 와류발생부대신 오리피스 입구근처에서 러너 블레이드 수 변화에 따른 자유수면 아래 와류 수차 성능에 대해 분석하였다. 와류 수차 성능을 분석하기 위해 곡선형 블레이드를 설계 및 제작하였으며, 연직방향 4개 지점에서 실험을 하였다. 접선방향의 유속, 와류 높이, 전류, 전압, 회전수 및 출력을 측정해 분석하였다. 실험을 수행함으로써 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 와류발생부의 접선방향 평균 유속은 5개의 블레이드에서 상대적으로 약간 높게 나타난다. 평균 회전수는 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하였다. 오리피스 입구지점에서 회전수는 블레이드 수 증가함에 따라 증가하였다. 이때 와류 높이는 상대 와류 수심비(y/h_v) 0.222 지점에서 상대적으로 높게 나타난다. 평균 와류 높이는 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하였다.

2) 전압은 오리피스 근처에서 블레이드 수가 증가할수록 증가하는 현상을 보여준다. 전압 증가폭은 5개의 블레이드부터 감소하였다. 전류는 상대 와류 수심비(y/h_v)가 증가할수록 블레이드 수 조건에 상관없이 감소하며, 오리피스 입구에 근접할수록 증가한다. 평균 전류는 5개의 블레이드에서 상대적으로 높게 나타난다. 순환매개변수는 블레이드 수와 상관없이 패턴이 비슷하지만 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하는 현상을 보였다.

3) 블레이드 수 증가는 발전기 출력과 효율에 영향을 주며, 수차의 성능이 오리피스 입구지점에서 블레이드 수가 증가할수록 증가하였다. 평균 출력은 5개의 블레이드까지 증가하다가 감소하였다. 발전기 출력은 블레이드 수와는 상관없이 자유수면으로 갈수록 와류세기가 감소하기 때문에 감소하였다. 발전기 출력은 효율적인 상대 직경비 0.17 ~ 0.185 범위를 벗어났기 때문에 낮게 나타난다. 출력은 와류발생부 내에 설치한 큰 블레이드 수차보다 오리피스 근처에 설치된 작은 블레이드 수차가 높게 나타난다.

본 연구에서는 실험 조건의 제약으로 한 가지 곡선형 블레이드 형상만을 실험하였으나 블레이드 형상의 영향에 대한 정확한 검토와 최적 설계를 위해서는 블레이드 형상을 좀 더 다양하게 변경하여 효율 및 유체의 항력을 분석할 필요가 있을 것으로 사료된다.

사 사

본 연구에 사용된 실험기는 한국친환경에너지기술(주) 지원에 의해 제작되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- Chattha, JA, Cheema, TA and Khan, NH (2017). Numerical investigation of basin geometries for vortex generation in a gravitational water vortex power plant, The 8th International Renewable Energy Congress.
- Choi, IH, Kim, JW and Chung, GS (2020). Experimental study of micro hydropower with vortex generation at lower head water. *J. of Wetlands Research*, 22(2), pp. 121–129. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2020.22.2.121>]
- Choi, IH, Kim, JW and Chung, GS (2021). Effect Analysis of Pulley on Performance of Micro Hydropower in Free Surface Vortex. *J. of Wetlands Research*, 23(3), pp. 234–241. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.3.234>]
- Choi, IH, Kim, JW and Chung, GS (2022). Effect Analysis of Relative Position of Blade on Performance of Micro Gravitational Vortex Turbine in Free Water Surface. *J. of Wetlands Research*, 24(3), pp. 196–203. [Korean Literature] [DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2022.24.3.196>]
- Dhakal, S, Timilsina, AB, Dhakal, R, Fuyal, D, Bajracharya, TR, Pandit, HP, Amatya, N and Nakarmi, AM (2015). Comparison of cylindrical and conical basins with optimum position of runner: Gravitational water vortex power plant. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.030>]
- Drioli, C (1947). Su un particolare tipo di imbocco per pozzi di scarico(scaricatore idraulico a vortice), *L'Energia Elettrica*, 24(10), pp. 447–452. [Italian Literature]
- Drioli, C (1969). Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a vortice. *L'Energia Elettrica*, 66(6), pp. 399–409. [Italian Literature]
- Kim, MS, Edirisinghe, DS, Yang, HS, Gunawardane, SDGSP, Lee, YH (2021). Effects of blade number and draft tube in gravitational water vortex power plant determined using computational fluid dynamics simulations. *J. Advanced Marine Engineering and Technology*, 45(5), pp. 252–262. [<https://doi.org/10.5916/jamet.2021.45.5.252>]

- Kouris, PS (2000). Hydraulic Turbine Assembly. US Patent US006114773A.
- Li, HF, Chen, HX, Ma, Z, Yi, Z (2008). Experimental and numerical investigation of free surface vortex. *J. Hydrodyn.* 20(4), pp. 485–491. [https://doi.org/10.1016/S1001-6058(08)60084-0]
- Mulligan, S (2015). Experimental and Numerical Analysis of Three Dimensional Free-Surface Turbulent Vortex Flows with Strong Circulation, Ph. D. Dissertation, IT Sligo, Sligo.
- Mulligan, S, Casserly, J, Sherlock, R (2016). Effects of geometry on strong free surface vortices in subcritical approach flows. *J. Hydraul. Eng.* 142(11), [https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001194]
- Mulligan, S, Creedon, L, Casserly, J, Sherlock, R (2018). An improved model for the tangential velocity distribution in strong free-surface vortices: An experimental and theoretical study. *J. Hydraul. Res.* 57(4), pp. 547–560. [https://doi.org/10.1080/00221686.2018.1499050]
- Nishi, Y and Inagaki, T (2017). Performance and flow field of a gravitation vortex type water turbine. *International Journal of Rotating Machinery*, [https://doi.org/10.1155/2017/2610508]
- Power, C, McNabola, M and Coughlan, P (2016). A parametric experimental investigation of the operating conditions of gravitational vortex hydropower(GVHP). *J. of Clean Energy Technologies*, vol.4,no.2, pp.112–119. [DOI: 10.7763/JOCET.2016.V4.263]
- Rankine, WJM(1858). Manual of Applied Mechanics, C. Griffen Co., London
- Shabara, HM, Yaakob, OB, Ahmed, YM and Elbatran, AH (2015). CFD Simulation of Water Gravitation Vortex Pool Flow for Mini Hydropower Plants. *J. Teknologi* 74(5), pp. 77–81. [https://doi.org/10.11113/jt.v74.4645]
- Turbulent (2020). Turbulent Company Website. [https://www.turbulent.be]
- Ullah, R, Cheema, TA, Saleem, AS, Ahmad, SM, Chattha, JA, Park, CW (2020). Preliminary experimental study on multi-stage gravitational water vortex turbine in a conical basin. *Renewable Energy* 145(1), pp. 2516–2529. [DOI:10.1016/j.renene.2019.07.128]
- Wardhana, EM, Santoso, A and Ramdani, AR (2019). Analysis of Gottingen 428 Airfoil Turbine Propeller Design with Computational Fluid Dynamics Method on Gravitational Water Vortex Power Plant. *International J. of Marine Engineering Innovation and Research*, Vol. 3(3), Mar. 2019. pp. 69–77. [DOI: 10.12962/j25481479.v3i3.4864]
- Zhang, ZP and Wang, BC (2019). Direct Numerical Simulation of Turbulent Flow in a Circular Pipe Subjected to Radial System Rotation, Flow, Turbulence and Combustion, 103, pp.1057–1079. [https://link.springer.com/article/10.1007/s10494-019-00062-8]
- Zotlötterer, F (2004). Hydroelectric power plant. Patent WO 2004/061295A3, 2004