

# 자유수면에서 마이크로 중력식 와류 수차 성능에 블레이드의 상대위치 변화가 미치는 영향 분석

최인호\*·김종우\*\*·정기수\*\*

\*서일대학교 건설시스템공학과

\*\*한국생산기술연구원

## Effect Analysis of Relative Position of Blade on Performance of Micro Gravitational Vortex Turbine in Free Water Surface

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

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

\*\*Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

(Received : 5 July 2022, Revised : 3 August 2022, Accepted : 3 August 2022)

### 요약

본 논문은 자유수면에서 마이크로 중력식 와류 수차의 성능에 블레이드 상대위치 변화의 영향을 이해하는 것이다. 일정한 와류 유동에서 자유수면 아래 상대 와류 수심비( $y/h_v$ )의 범위 0 ~ 0.778 지점에 설치된 블레이드의 위치 변화에 따른 마이크로 와류 수차의 회전수, 전압 및 전류를 측정하였다. 유량은 0.0063 ~ 0.00662 m<sup>3</sup>/s 범위이다. 실험 결과는 유입되는 유속과 난류강도의 분포가 변하기 때문에 블레이드의 상대위치가 마이크로 와류 수차의 성능에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 와류 수차에서 발생하는 에너지의 최대량은 상대 와류 수심비 0.111 ~ 0.222 지점에서 발생했다. 상대 와류 수심비 0.111 지점의 출력은 자유수면 아래 상대 와류 수심비 0.588 지점보다 약 2.4배 더 크게 나타난다.

핵심용어 : 자유수면, 와류 수차, 블레이드, 상대위치

### Abstract

This paper contributed to the understanding of the effect of the blade relative position on performance of micro gravitational vortex turbine in free water surface. In a constant vortex flow, the rotation, voltage and current of micro vortex water turbine were measured according to the position change of the blade installed at the relative vortex height ( $y/h_v$ ) ranging from 0 to 0.778 below the free water surface. The flow rate ranged from 0.0063 to 0.00662 m<sup>3</sup>/s. The results of the experiments showed that relative positions of the blade affected the performance of vortex water turbine because the distributions of incoming flow velocity and turbulence intensity were changed. The highest amount of the energy generated by the vortex water turbine occurred in the relative vortex height ranging from 0.111 to 0.222. The output power at the relative vortex height of 0.111 was about 2.4 times larger than the relative vortex height of 0.588 below the free water surface.

Key words : Free water surface, Vortex water turbine, Blade, Relative position

\*To whom correspondence should be addressed.

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

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

## 1. 서 론

2050 탄소중립 시나리오 계획에 따라 우리나라의 신재생 에너지 발전 비중 목표는 2019년에 6.34 %에서 2034년까지 25.8 %까지 확대할 것으로 신재생에너지 정책심의회에서 2020년 12월 29일 확정했다. 신재생에너지는 태양력, 풍력, 수력, 조력, 지열 등을 포함한다. 대규모 수력발전은 댐 건설로 인한 환경 문제가 대두되며, 조력발전은 대형방조제 건설로 인해 연안환경에 지장을 주고 갯벌과 습지 파괴 등 해양 생물다양성에 영향을 줄 수 있다. 따라서 100 kW 이하의 마이크로 소수력발전에 관심과 필요성이 증가하고 있다. 저낙차와 저유량에 해당하는 마이크로 와류 수차는 단위 출력당 경제성이 높고 환경 친화적이며, 물이 있는 다양한 곳(해양심층수 배출수, 양식장, 하수처리장, 정수장, 농업용 저수지, 다목적댐 용수로, 화력발전소 냉각수, 하천 등)에 적용할 수 있다는 점을 감안할 때 개발 잠재량이 풍부하다.

마이크로 와류 수차는 유입부, 와류발생부 및 유출부로 구성된다. 유량이 유입되고 유출되는 동안 와류발생부에서 중력식 소용돌이가 발생하여 블레이드를 회전시켜 에너지를 생성한다. 와류는 블레이드 주변의 자유수면 위로 공기를 유입시키므로 유출수의 용존산소 농도를 높일 수 있어 환경 친화적이다. 와류 수차의 와류발생부는 원통형(cylindrical basin)과 원뿔형(conical basin)으로 구분한다. Zotlöterer (2004)는 원통형 와류발생부에서 저낙차와 저유량일 때 효율성이 높은 발전시스템을 제시하였다. Nishi and Inagaki (2017)는 와류 수차의 원통형 와류발생부에서 토크, 전력, 효율을 측정하였다. Shabara et al. (2015)와 Wardhana et al. (2019)은 와류부 본체의 흐름형태에 대해 유동해석(CFD)을 하였지만 와류부내 다양한 난류거동에 대한 연구가 요구된다(Spalart and Shur, 1997; Suerich-Gulick et al., 2013). 와류강도(vortex strength)는 직경비와 에어코어 형태에 영향을 받으며 와류 내 복잡한 흐름은 다양한 물리적 인자(에어코어의 거동과 마찰손실 등)에 의존한다(Chattha et al., 2017). Ullah et al. (2020)는 원뿔형 와류발생부에서 단일 수차보다 다중 수차의 발전성능이 크다는 사실을 증명하였다. 와류 수차의 와류발생부는 구조가 간단하지만 자유수면이 있어 흐름이 복잡하며 강한 소용돌이가 발생한다(Odgaard, 1986; Vatistas et al., 1986; Mulligan et al., 2010). Drioli (1947)은 와류발생부에 강하게 발생하는 와류를 최초로 수리공학에 도입하였으며, 수공구조물 내 와류 드롭 샤프트를 고안했다. Zotlöterer (2009)은 와류발생부의 와류를 발전시스템에 적용하였다. 와류 수차는 환경 친화적이지만 저낙차와 저유량에 적합한 높은 효율 발전시스템을 개발하는 것이 요구되고 있다.

국내 마이크로 와류 수차개발은 해외기술에 비해 핵심 원천기술 확보가 미흡하다. Choi et al. (2020)은 자유수면에서 와류 수차의 유출구 직경비 변화에 따른 물리적 매개변수(토크, 회전수, 블레이드 형태, 와류 높이, 직경비 등)에

대해 실험하였고 유출구의 직경비 0.17~0.185 범위를 제시하였다. Lee and Kim (2021)은 제작한 C-로터의 블레이드를 적용하여 풍력을 이용한 와류 터빈 성능실험을 하였으며 전산유체해석을 진행하여 비교 검증하였다. Choi et al. (2021)은 자유수면에서 와류 수차의 성능에 영향을 주는 폴리비와 블레이드에 따른 효율과 출력을 측정하였다.

본 연구에서는 원통형 와류 수차 성능에 대한 블레이드 상대 위치의 영향을 실험하였다. 수차 블레이드는 와류발생부의 저면 오리피스 영역을 포함한 자유수면 아래의 상대 와류 수심비( $y/h_v$ ) 7개 지점에 설치하였다. 와류발생부 내 접선방향의 유속변화를 고려하여 와류 수차 블레이드의 상대위치를 결정하였다. 횡방향 4개 지점에서 접선방향의 유속을 측정하였다. 상대 와류 수심비에 따른 마이크로 와류 수차의 회전수, 전압 및 전류를 측정하여 와류 수차의 성능에 대한 영향을 연구하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 와류 수차의 구조와 출력

실험에 사용된 중력식 와류 수차는 개수로와 연결된 유입부, 와류발생부 및 유출부로 구성한다. 유수가 원통형 와류발생부내에서 회전하며 하부 오리피스를 통해 외부로 배출된다(Fig 1).

접선방향의 와류유속은 다음과 같이 표현한다(Rankine, 1858).

$$v_{\theta} = \frac{\Gamma}{2\pi r} \tag{1}$$

여기서  $V_{\theta}$ 은 접선방향의 유속,  $r$ 는 와류반경,  $\Gamma$ 는 순환 매개변수이다.

Fig. 1은 와류 수차의 평면도와 측면도를 나타낸다. 와류 수차 발전장치는 폭 160 mm, 높이 300 mm, 길이 1500 mm인 개수로에 연결한다. 와류 수차는 유입부, 와류발생부, 유동면적 조절부(조리개) 및 임펠러부로 구분한다. 평면도를 통해 알 수 있듯이 유입된 유량은 와류를 형성하고

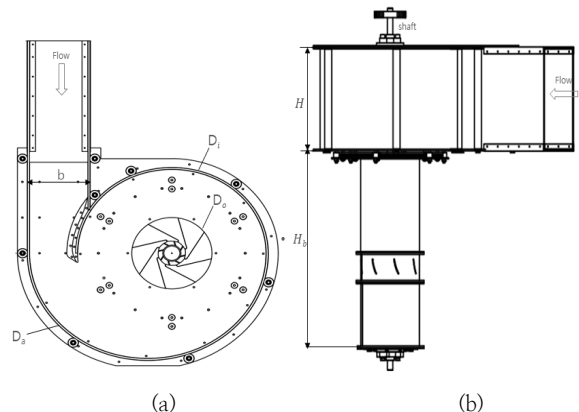


Fig. 1. Schematic of (a) top view and (b) sectional view of vortex turbine.

Table 1. Specification of the cylindrical basin

Description	Symbol	Dimensions
Outer diameter of basin	$D_a$	0.58 m
Inner diameter of basin	$D_i$	0.47 m
Orifice diameter	$D_o$	0.125 m
Entrance width of vortex generation	$b$	0.16 m
Height of cylindrical basin	$H$	0.30 m
Outlet height	$H_b$	0.575 m

유동함에 따라 와류세기가 증가한다(Fig. 1(a)). 따라서, 유수에 효과적으로 와류를 형성하고 강화함으로써 회전부에 가해지는 유수의 충격력을 높여 와류 수차의 발전효율을 높일 수 있다. 유입되는 유수의 유량과 오리피스 단면적 사이의 상관관계에 따라 와류세기가 달라질 수 있다(Choi et al., 2020). 또한 일정한 와류유동에서 블레이드의 상대 와류 수심비( $y/h_v$ )가 발전효율에 영향을 줄 수 있다. 원통형 와류발생부에 관한 실험기 제원을 다음 Table 1에 정리하여 제시했다.

이론 출력( $P_{in}$ )은 유입 및 유출하는 동안 에너지변화를 고려하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

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

여기서  $\rho$ 는 유체 밀도( $\text{kg/m}^3$ ),  $g$ 는 중력가속도( $\text{m/s}^2$ ),  $Q$ 은 유량( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $H_e$ 는 유효낙차(m)이다.

유효낙차는 Bernoulli 정리를 적용하면 식(3)와 같이 나타낸다(Choi et al., 2021).

$$H_e = H_1 + \Delta h - H_2 \quad (3)$$

여기서  $H_1$ 은 상류단 와류바닥을 기준으로 측정된 에너지,  $\Delta h$ 는 하류단 하상으로부터 상류단 하상까지 높이(m),  $H_2$ 은 하류단 와류바닥을 기준으로 측정된 에너지이다.

발전기 출력( $P_{out}$ )은 전압(V)과 전류(I)의 곱으로 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{out} = V \cdot I \quad (4)$$

수차 효율( $\eta$ )은 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \quad (5)$$

## 2.2 발전기 장치와 실험방법

수차 블레이드 상대위치 변화에 따른 와류 수차의 성능을 조사하기 위해 Fig. 2와 같은 실험장치를 사용하였다. 발전 장치는 와류부 상부에 설치되었으며, 선앤윈드에너지사에서 개발한 300 W 하드아노다이징 알루미늄 발전기(Hard Anodizing Aluminum Generator)와 동력전달장치를 포함한다(Fig. 2). 발전기 출력의 비교분석자료는 Choi et al. (2021)에 언급되었다. 유량이 곡물형태로 이루어진 와류 발생부에 유입되면 소용돌이가 발생한다. 와류는 블레이드를 돌려 폴리와 회전축에 회전력을 전달한다.

와류 회전력이 회전중심축(샤프트)에 연결된 구동폴리와 벨트를 통해 발전기에 전달된다. 발전기에서 발생하는 교류(AC)를 직류(DC)로 바꿔주는 장치는 3상 브리지다이오드(MDS50-16)를 사용하였다. 전압과 전류측정은 디지털 멀티미터(디지털 후크메타 3280-10과 AC/DC 클램프 미터)를 이용하였다. 부하는 램프(각 10W, 220V)를 직렬로 결선하여 설정하였다. 동일한 부하에 걸리는 전압과 부하전류를 블레이드의 위치변화에 따라 분석하였다. 와류 발생부 내 접선방향의 유속은 유입유량  $0.0076 \text{ m}^3/\text{s}$ 와 상대 직경비( $D_o/D_a$ ) 0.216 조건에서 1차원 전자식 유속계(KENEK GR20)로 측정하였다.

본 연구는 소용 비틀린 블레이드를 사용하였다. 소형 비틀린 블레이드의 직경(D)과 높이(H)는 각각 110 mm와 150 mm이다(Fig. 3). 와류 수차 블레이드는 회전중심축에 설치하였으며, 접선방향의 유속을 고려하여 상대위치 범위는 와류발생부 바닥근처에서 자유수면 근처까지이다. 와류 수차의 성능에 영향을 주는 인자(회전수, 유속, 와류높이, 전류 및 전압)는 상대 와류 수심비( $y/h_v$ ) 0.005, 0.065, 0.111, 0.222, 0.417, 0.588와 0.778 지점에서 측정하였다.  $y$ 는 와류발생부의 바닥으로부터 수심이며  $h_v$ 는 와류높이를 말한다.

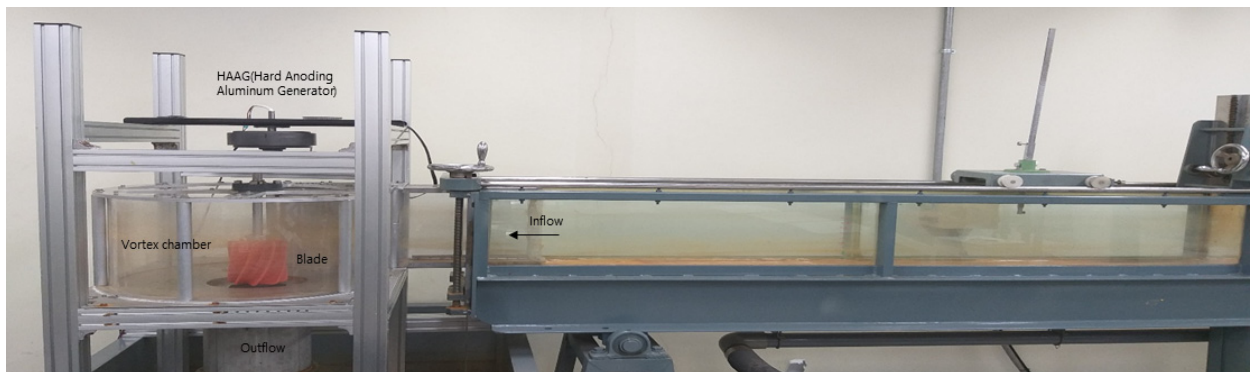


Fig. 2. Experimental setup for performance investigation of vortex water turbine with permanent magnet generator(Choi et al., 2021).

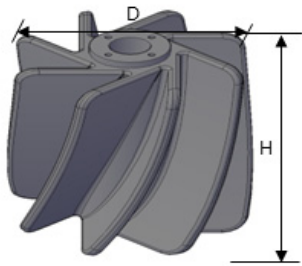


Fig. 3. 3D schematic drawing of small twisted blade of 110 mm diameter(D) and 150 mm height(H).

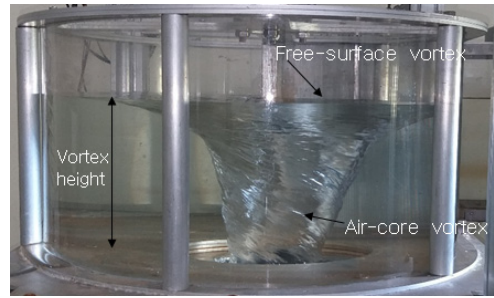


Fig. 4. Full air-core vortex and strong free-surface vortex in vortex chamber.

### 3. 실험결과

#### 3.1 와류발생부에서 접선방향의 유속변화

Fig. 4는 유입유량  $0.0076 \text{ m}^3/\text{s}$ 와 상대 직경비( $D_o/D_a$ ) 0.216 조건에서 와류높이(vortex height), 자유수면 와류(free-surface vortex) 및 에어코어(air-core)를 도시했다. 와류 발생부에서 와류 유동(vortex flow)이 발생하였다. 와류 유동 내 강한 에어코어(air core)가 나타났다. 에어코어의 폭은 와류발생부 상부에서 하부로 내려갈수록 감소하였다. 와류높이는 18 cm, 와류직경은 자유수면에서 24.3 cm, 중간 지점에서 12 cm 및 와류발생부 바닥지점에서 8.5 cm이다. 공동현상이 와류강도에 따라 자유표면에서 유출구까지 발생하였으며, 매우 강한 와류가 나타났다(Fig. 4).

Fig. 4에서 나타난 강한 와류현상은 접선방향의 유속변화에서 확인할 수 있다(Fig. 5). 접선방향의 유속은 수평방향과 수직방향에서 측정하였다. 이때 직경비( $D_o/D_a$ )는 0.216, 와류높이( $h_v$ )는 18 cm, 상부 표면에서 와류직경은 24.3 cm이다. Fig. 5를 보면 접선방향의 유속은 상대 와류 수심비( $y/h_v$ ) 0.111 지점에서 상대적으로 높게 나타난다. 유체가 넓은 와류유동에서 오리피스와 같은 좁은 출구로 유출될 때

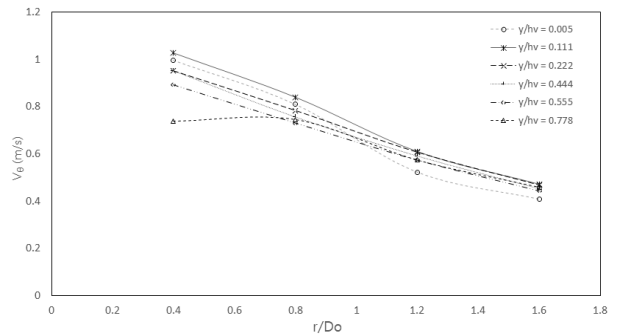


Fig. 5. Experimental data of tangential velocity.

접선방향의 유속은 유출구 근처에서 증가하는 것을 볼 수 있다. 동일한 조건에서 수로 내 평균유속은 25 cm/s이며, 접선방향의 유속은 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 최대 108.3 cm/s로 약 4.3배 증가하였다. 접선방향의 유속은 벽면에 가까울수록 벽면 마찰력 때문에 감소하였고 에어코어로 갈수록 증가하는 현상을 보였다.

Fig. 6은 와류발생부의 수평방향의 순환매개변수( $\Gamma$ ) 변화를 보여준다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 순환매개변수의 패턴은 비슷하며, 접선방향의 유속과 와류반지름에 영향을

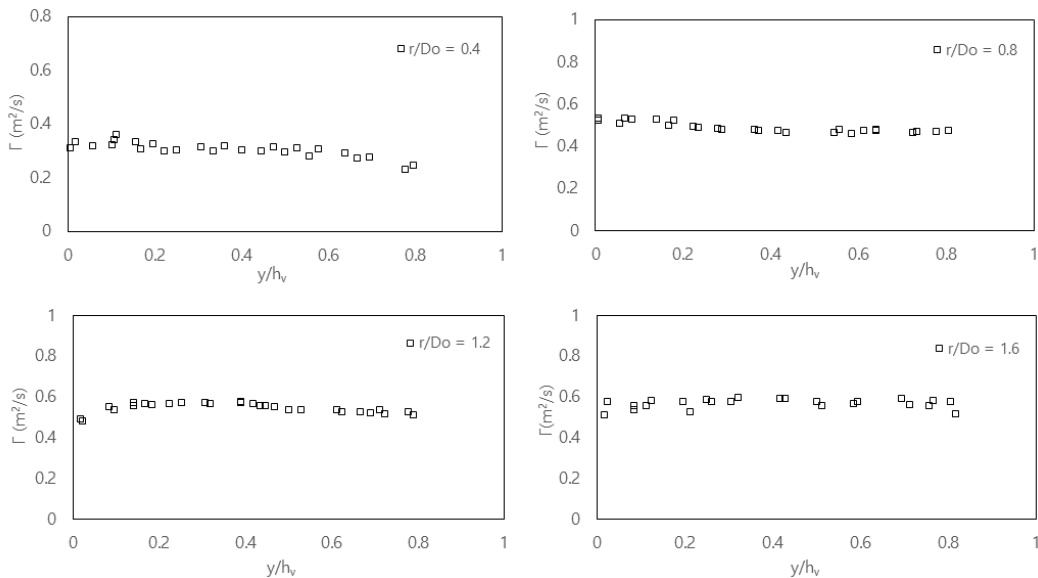


Fig. 6. Circulation  $\Gamma$  distribution in vortex chamber.

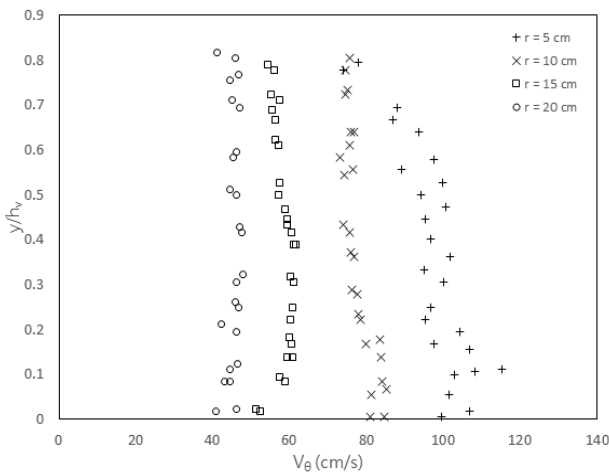


Fig. 7. Tangential velocity in vortex chamber.

받는다. 이때 순환 방향은 반시계 방향이다. 와류의 영향이 감소되는 유출구 내와 자유수면근처에서 순환매개변수가 감소하였으며, 접선방향의 유속이 증가한 와류 수심비 0.111 지점에서 약간 증가하였다.

Fig. 7은 수심비와 와류발생부의 중심축으로부터 반경(r)에 따른 접선방향의 유속 변화를 보여준다. 접선방향 유속

의 패턴을 비교해 보면 벽면으로 갈수록 유속분포는 수심비에 따라 일정하지만 와류 중심축으로 갈수록 변화의 폭이 증가하는 경향을 나타낸다. 유속은 와류 중심축으로 갈수록 에어코어(air core)의 영향을 강하게 받고 반대로 와류로부터 떨어질수록 벽면과 하상마찰력에 영향을 받는 것으로 판단된다. Fig. 7을 보면 최대유속이 중심축으로부터 수평방향 반경(r) 5 cm 지점의 오리피스 근처에서 발생하고 있다. 즉, 최대 유속은 단면적이 감소하는 오리피스 근처 지점인 상대 와류 수심비 0.111 ~ 0.222 지점에서 나타났다. 이러한 경향은 강한 와류유동과 단면변화가 시작되는 전 지점에서 발생하였다.

### 3.2 블레이드의 상대위치 변화에 따른 전압과 전류

Fig. 8은 와류발생부에서 수차 블레이드의 상대위치를 보여준다. 수차 블레이드의 상대 와류 수심비( $y/h_v$ )는 수직방향으로 7개 지점이며, 그 범위는 0 ~ 0.778 지점이다. 전압과 전류는 오리피스 근처 지점에서 상부 자유표면 지점까지 수차 블레이드 위치를 변화시키면서 측정하였다.

Table 2와 Fig. 9(a)는 와류 수차 블레이드의 상대 와류 수심비( $y/h_v$ )에 따른 측정된 전압과 전류를 나타낸다. 영구 자석발전기에서 발생된 전압과 전류는 부하장치를 연결하

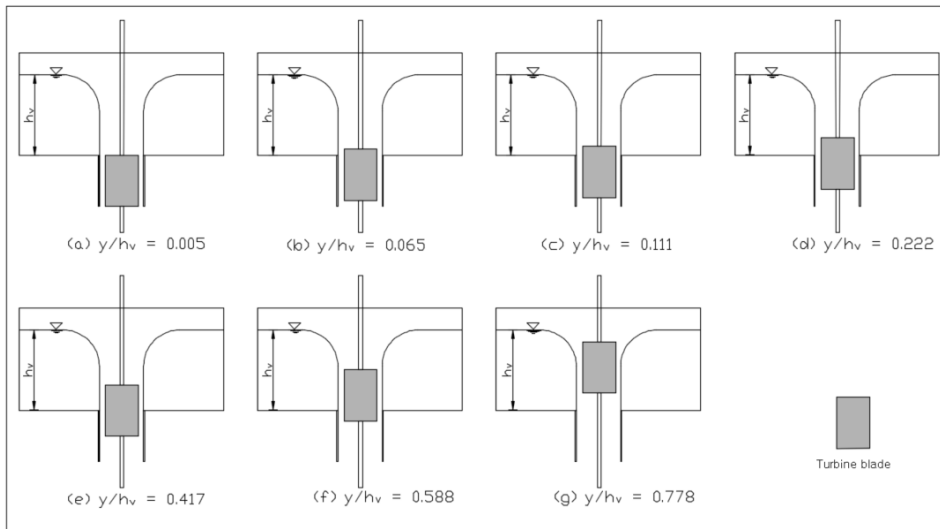


Fig. 8. Relative position of turbine blade in vortex chamber.

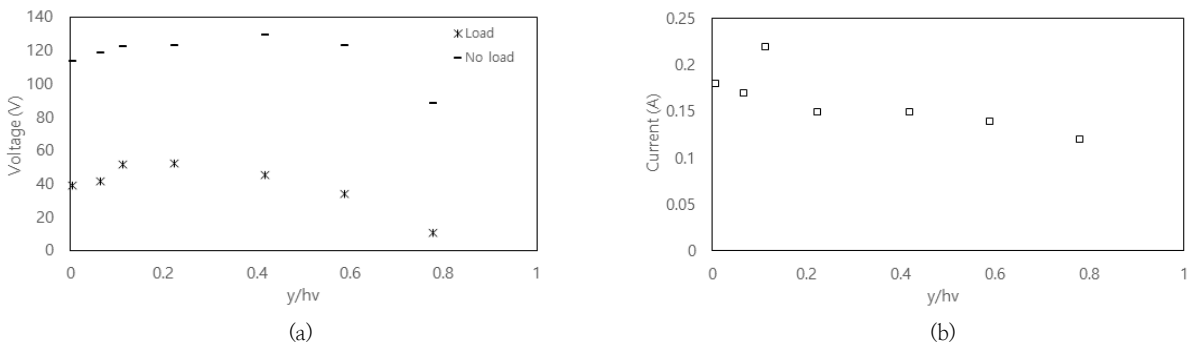


Fig. 9. (a) Voltage and (b) current of vortex turbine with increasing relative vortex height.

Table 2. Voltage, current, power and efficiency with increasing relative vortex height

Run No.	y/h <sub>v</sub>	Voltage (V) with load	Current (A)	P <sub>out</sub> (W)	v <sub>1</sub> (m/s)	v <sub>2</sub> (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	H <sub>c</sub> (m)	P <sub>m</sub> (W)	η (%)
S1	0.005	38.9	0.18	7.002	0.222	0.632	0.00657	0.657	42.31	16.55
S2	0.065	41.5	0.17	7.055	0.223	0.625	0.00666	0.657	42.54	16.58
S3	0.111	51.8	0.22	11.39	0.228	0.650	0.00658	0.651	41.99	27.13
S4	0.222	52.0	0.15	7.80	0.221	0.640	0.00635	0.652	40.55	19.23
S5	0.417	45.5	0.15	6.825	0.226	0.670	0.00649	0.649	41.35	16.50
S6	0.588	34.0	0.14	4.760	0.217	0.630	0.00651	0.659	42.04	11.32
S7	0.778	10.8	0.12	1.296	0.229	0.670	0.00661	0.649	42.09	3.07

여 디지털 멀티미터(디지털 후크메타 3280-10과 AC/DC 클램프 미터)로 측정하였다. 무부하 조건에서 전압은 상대 와류 수심비 0.005, 0.065, 0.111, 0.222, 0.588 지점에서 각각 113.5 V, 118.3 V, 122 V, 123 V를 유지하다가 상대 와류 수심비 0.778 지점에서 88 V로 감소하였다. 반대로 부하 조건에서 전압은 상대 와류 수심비 0.005, 0.065, 0.111, 0.222, 0.588 지점에서 각각 38.9 V, 41.5 V, 51.8 V, 52 V, 34 V로 증가 및 감소하다가 상대 와류 수심비 0.778 지점(S7)에서 10.8 V로 급격히 감소하였다. Fig. 9(a)에서 전압은 오리피스 근처 상대 와류 수심비 0.111 지점(S3)과 0.222 지점(S4)인 경우 가장 크고 자유수면으로 갈수록 감소하는 현상을 보여준다. 블레이드의 상대 와류 수심비(y/h<sub>v</sub>) 0.111 지점(S3)에서 가장 큰 유속을 발생시키기 때문에 부하 조건에서 전류가 증가하는 것을 볼 수 있다 (Fig. 9(b)).

### 3.3 무부하와 부하 상태에서 회전수

Fig. 10은 직경비(D<sub>o</sub>/D<sub>a</sub>) 0.216 조건에서 블레이드의 상대 위치에 따른 회전수변화 곡선을 나타낸다. 와류와 전압 및 전류에 영향을 주는 회전수(rotational speed)에 대해서 Fig. 10을 보면 유출구 지점(S1)과 자유수면 근처(S7)로 갈수록 회전력은 감소하였다. 사프트와 발전기의 회전수는 무부하 조건에서 상대 와류 수심비 0.005, 0.065, 0.778 지점을 제외하면 일정한 값을 보여준다. 사프트의 회전수는 부하 조건 아래 상대위치 0.111 지점(S3)과 0.222 지점(S4)에서 각각 114 rpm와 123 rpm으로 다른 지점보다 크며, 무

부하 조건 아래 두 지점에서 회전수는 각각 252 rpm와 253 rpm을 보여준다(Fig. 10(a)). 무부하 조건보다 부하 조건에서 사프트와 발전기의 회전수가 감소하는 것을 알 수 있다. 영구자석발전기의 회전수가 사프트의 회전수보다 약 2배 큰 것은 회전중심축의 구동 폴리 지름(88.94 mm)이 발전기의 피동 폴리 지름(40.43 mm)보다 약 2배 크기 때문인 것으로 판단된다(Fig. 10(b)). 부하와 무부하 조건에서도 회전수의 결과는 거의 비슷한 패턴을 보이고 있다.

### 3.4 와류 수차의 출력과 효율

와류 수차의 출력(P<sub>out</sub>)은 동일한 직경비(D<sub>o</sub>/D<sub>a</sub>) 0.216 조건에서 블레이드의 상대위치변화에 따라 측정하였다. 반시계 방향으로 회전하는 와류의 효과는 Fig. 11에서 출력의 결과로 확인할 수 있다. 발전기 출력은 자유수면 근처 상대 와류 수심비 0.778 지점(S7)에서 와류세기와 영향이 감소할 때 1.3 W로 가장 작은 값을 보였지만 상대 와류 수심비 0.111 지점(S3)에서 11.39 W로 약 8.8배 증가하였다. Fig. 11에서 보듯이 와류 수차의 출력은 유출구 근처 와류 수심비 0.005 지점(S1)에서 7 W로 상대 와류 수심비 0.111 지점(S3)보다 약 39 % 감소했다. 이와 같은 결과는 유출구 단면적변화에도 불구하고 와류세기 저감의 효과라고 판단한다.

Fig. 12(a)는 이론 출력과 발전기 출력을 비교한 것이다. 이론 출력(P<sub>m</sub>)은 유량과 유효낙차(H<sub>e</sub>)를 고려하여 산정하였다. 유효낙차는 블레이드의 상대위치 변화에 따른 개수로 내 평균 유속(v<sub>1</sub>), 와류발생부의 하류부에서 유속(v<sub>2</sub>)과

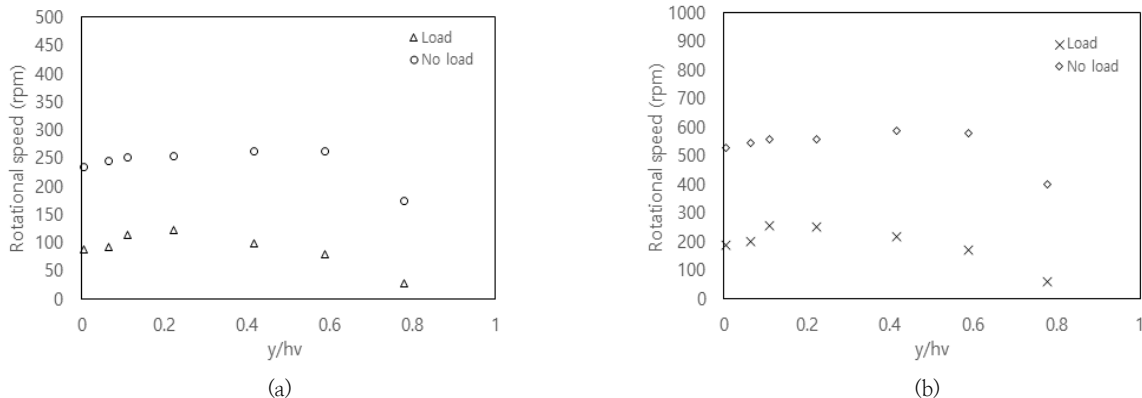


Fig. 10. Rotation speed of (a) shaft and (b) generator with increasing relative vortex height.

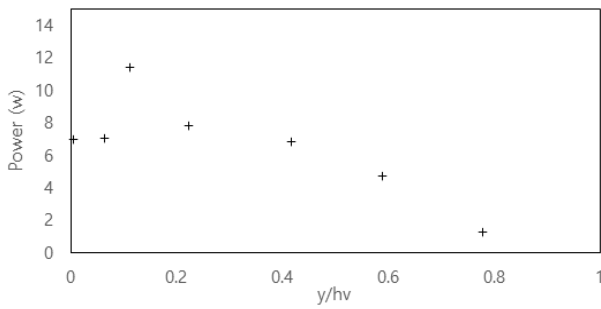
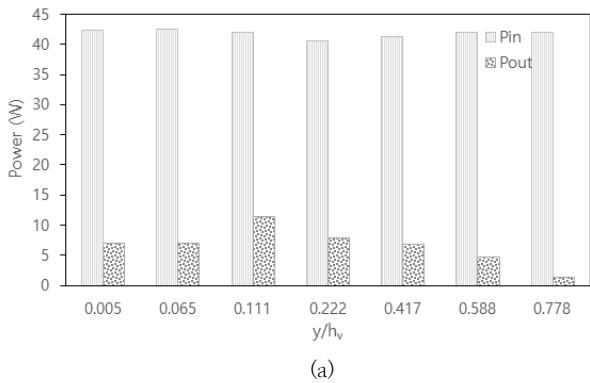
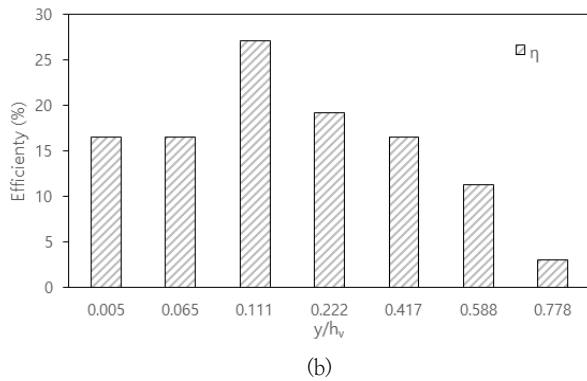


Fig. 11. Power of vortex turbine with increasing relative vortex height.



(a)



(b)

Fig. 12. (a) Power and (b) efficiency of vortex turbine with increasing relative vortex height ( $\eta$ : efficiency,  $P_{in}$ : hydraulic power,  $P_{out}$ : output power).

수심을 측정하여 결정하였다. 영구자석발전기의 출력( $P_{out}$ )은 전압과 전류를 통해 측정하였다. 와류 수차의 출력( $P_{out}$ )은 블레이드의 상대위치에 따라 변화하였다. 이론 출력( $P_{in}$ )은 블레이드의 상대위치 변화와 상관없이 일정한 반면 와류 수차의 출력( $P_{out}$ )은 블레이드의 상대 와류 수심비 0.111 지점(S3)에서 증가한다는 사실을 알 수 있다. 이때 전압과 전류는 각각 51.8 V와 0.22 A이다.

Fig. 12(b)는 블레이드 상대위치 7 지점의 발전효율을 도시하였다. 효율은 상대위치에 따른 3 ~ 28 % 범위이다. 이론 출력( $P_{in}$ )의 범위는 40 ~ 43 W이며 발전기의 출력( $P_{out}$ )은 1 ~ 11.4 W 범위를 나타낸다. 최대 효율은 상대 와류 수심비 0.111 지점(S3)에서 발생했다. 와류 수차의 효율은 블레이드의 상대위치에 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

### 4. 결론

수차 블레이드의 상대위치 변화에 따라 마이크로 와류 수차의 출력에 미치는 물리적인 영향을 좀 더 자세하게 이해할 수 있도록 연구를 수행하였다. 블레이드의 상대위치는 수직방향 7개 지점을 선택하였다. 본 연구에서는 접선방향의 유속, 와류높이, 전류, 전압, 회전수 및 출력을 측정하였으며, 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 와류발생부내에서 접선방향의 유속은 와류유동 근처에서 크게 증가한다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한 접선방향의 유속은 단면적이 감소하는 오리피스 출구 근처 상대 와류 수심비 0.111 ~ 0.222 지점에서 높게 나타난다. 최대 접선방향의 유속은 와류 수심비( $y/h_v$ ) 0.111 지점에서 발생하였다. 유체가 오리피스와 같은 좁은 출구로 유출될 때 접선방향의 유속은 유출구 근처에서 증가하는 것을 볼 수 있다.

2) 접선방향의 유속 패턴을 고려하여 블레이드의 상대 와류 수심비 7개 지점에서 전류 및 전압을 측정하였다. 부하 조건에서 전압과 전류는 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 증가하다가 자유수면으로 갈수록 감소하는 현상을 볼 수 있었다. 전류는 부하 조건에서 블레이드의 상대 와류 수심비( $y/h_v$ ) 0.111 지점에서 가장 크게 나타났다.

3) 사프트와 발전기의 회전수는 무부하 조건에서 상대 와류 수심비 0.005, 0.065, 0.778 지점을 제외하면 일정한 값을 나타낸다. 부하 조건에서 회전수는 수심비 0.111와 0.222 지점에서 가장 큰 값을 보여주었다.

4) 발전기 출력은 자유수면 근처 상대 와류 수심비 0.777 지점에서 와류의 영향이 감소할 때 가장 작은 값을 나타낸다. 또 저면 유출구 근처의 발전기 출력도 비슷한 경향을 볼 수 있다. 이미 이와 같은 결과는 유출구 단면적 변화에도 불구하고 와류저감의 효과라고 판단된다. 부하 조건에서 출력은 상대 와류 수심비 0.111 지점에서 크게 증가하였다.

따라서 와류 수차의 성능은 블레이드 상대위치의 영향을 크게 받는다. 현장에서 와류세기가 최대가 되는 수심비 0.111 ~ 0.222 지점에서 와류 수차 블레이드 위치를 결정해야 한다고 판단된다. 하지만 와류 수차의 성능은 다른 물리적 인자(와류유동, 와류강도, 와류발생부 형태, 에어코어, 블레이드 형태, 단일 수차 및 다중 수차 등)의 영향을 받으므로 이에 대한 지속적인 연구가 필요하다.

### 사 사

이 논문은 2022년 서일대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구함.

### 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* (IREC 2017)
- Choi, IH, Kim, JW and Chung, GS (2020). Experimental Study of Micro Hydropower with Vortex Generation at Lower Head Water, *J. of Wetlands Research* Vol. 22. No. 2. pp. 121–129. [Korean literature] [<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* Vol. 23. No. 3. pp. 234–241. [Korean literature] [<https://doi.org/10.17663/JWR.2021.23.3.234>]
- 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]
- Lee, JB and Kim, SH (2021). A Study on Structural Analysis of C-Rotor of Small Gravitational Water Vortex Turbines, *J. of Advanced Engineering and Technology* Vol. 14, No. 3, pp. 153–159. [DOI: [10.35272/jaet.2021.14.3.153](https://doi.org/10.35272/jaet.2021.14.3.153)]
- Mulligan, S and Casserly, J (2010). *The Hydraulic Design and Optimisation of a Free Water Vortex for the Purpose of Power Extraction*, Final Year Civil Engineering Project, Institute of Technology Sligo
- Nishi, Y and Inagaki, T (2017). Performance and flow field of a gravitation vortex type water turbine, *Int. J. Rotating Mach.* 2017, Article ID 2610508, pp. 1–11. [<https://doi.org/10.1155/2017/2610508>]
- Odgaard, AJ (1986). Free-surface air core vortex, *J. of Hydraulic Engineering*, vol. 112, no. 7, pp. 610 – 620. [[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1986\)112:7\(610\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1986)112:7(610))]
- 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>]
- Spalart, P and Shur, M (1997). On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature, *Aerospace Science and Technology*, 1(5), pp. 297–302. [[https://doi.org/10.1016/S1270-9638\(97\)90051-1](https://doi.org/10.1016/S1270-9638(97)90051-1)]
- Suerich-Gulick, F, Gaskin, SJ, Villeneuve, M and Parkinson, É (2013). Characteristics of Free Surface Vortices at Low-Head Hydropower Intakes, *J. of Hydraulic Engineering*, 140(3), pp. 291–299. [[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0000826](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000826)]
- 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](https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.07.128)]
- Vatistas, G, Lin, S and Kwok, C (1986). Theoretical and experimental studies on vortex chamber flows, *AIAA journal*, 24(4), pp. 635–642. [DOI: <https://doi.org/10.2514/3.9319>]
- 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. 69–77. [DOI: [10.12962/j25481479.v3i3.4864](https://doi.org/10.12962/j25481479.v3i3.4864)]
- Zotlöterer, F (2004). Hydroelectric power plant. Patent WO 2004/061295A3,2004
- Zotlöterer, F (2009). Hydroelectric power station. Google Patents