

## 자유수면을 갖는 2단 와류 수차의 성능에 관한 실험적 연구

김종우\*\* · 최인호\* · 정기수\*\*

\*서울대학교 건설시스템공학과

\*\*한국생산기술연구원

## Experimental Study on the Performance of a Two-Stage Vortex Turbine with a 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 : 27 June 2024, Revised : 01 August 2024, Accepted : 09 August 2024)

### 요약

본 논문은 자유수면을 갖는 2단 와류 수차의 성능에 관한 연구이다. 2단 러너의 성능은 원통형 와류발생부에서 유량 변화와 러너의 위치 변화에 따라 실험하였다. 실험결과로서 토크, 전압, 전류 및 회전 속도 등의 성능 매개변수는 유량이 증가함에 따라 증가하였다. 러너 수심비는 2단 와류 수차의 성능에 중요한 영향을 미친다. 2단 러너에 의해 생성된 가장 높은 발전량은 오리피스 근처의 러너 수심비 0.054~0.162 범위에서 발생하였다. 2단 러너의 출력은 단일 러너보다 더 많은 와류와 블레이드 접촉 면적으로 인해 7.2~7.7 L/s의 유량 범위에서 높았다.

핵심용어 : 자유수면, 2단 러너, 원통형 와류발생부, 러너 수심비

### Abstract

This research was conducted to determine the performance of a two-stage vortex turbine with a free water surface. The performance of the two-stage runner was studied by varying the flow rate and the position of the runner in the cylindrical vortex chamber. The experimental results showed that the performance parameters such as torque, voltage, current, and rotational speed increased with increasing flow rate. The runner depth ratio has a significant impact on the performance of the two-stage vortex turbine. The highest power generated by the two-stage runner occurred in the range of 0.054 to 0.162 runner depth ratio near the orifice. The power output of the two-stage runner was higher than that of the single runner due to more vortex and blade contact area in the flow range of 7.2 to 7.7 L/s.

Key words : Free water surface, Two-stage runners, Cylindrical vortex chamber, Runner depth ratio

## 1. 서론

온실가스 배출은 기후변화에 영향을 주며 기상 이변, 해수면 상승, 생태계 변화 등을 야기하고 있다. 지구온난화에 대한 우려가 높아지면서 화석연료에서 신재생에너지원으로의 전환에 대한 요구가 커지고 있다. 국제에너지기구(IEA)는 신재생에너지가 저탄소 공급원 중에서 온실가스 감축에 가장 큰 기여를 할 것으로 평가하였다(IEA, 2015). 정부의

신재생에너지 보급정책에 따른 신재생에너지 공급의무화제도(RPS, Renewable Portfolio Standard) 도입과 기업이 사용하는 전력의 100%를 신재생에너지로 충당하겠다는 취지의 글로벌 캠페인 RE100(Renewable Electricity 100%)에 따라 신재생에너지 개발의 필요성이 증가하고 있다.

신재생에너지원의 한 종류인 와류 수차는 대형방조제 건설로 인해 연안환경에 영향을 주는 조력발전과는 달리 저류시설이 필요가 없다. 마이크로 와류 수차는 갯벌을 파괴

\*All authors equally contributed

†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 / jwkim@seoul.ac.kr

• In-Ho Choi Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea / cih580@naver.com

• Gi-Soo Chung Korea Institute of Industrial Technology(KITECH) / gschung@kitech.re.kr

하지 않고 연안근처에 간단하게 설치할 수 있으므로 해양 생태계를 보존할 수 있다. 와류 수차의 발전시스템은 자유 수면와류 내에 공기를 유입시켜 어류의 성장과 생존에 있어 필수적인 요소인 용존산소 농도를 높일 수 있으므로 환경 친화적이다. 와류 수차는 환경조건에 따라 다양한 유동 특성을 나타내며, 물리적 매개변수(러너 블레이드 수, 와류 강도, 와류 수심비, 직경비, 유량, 와류 유속 등)는 발전 성능에 영향을 주므로 이에 대한 특성 검토는 필수적이다.

이와 관련된 연구로서 Zotloeterer (2004)는 저낙차 및 저유량에서 와류를 이용하는 수차(GVHP, Gravitation Vortex Hydropower)를 개발하였다. 기존에 개발된 펄톤 수차 및 카프란 수차도 저낙차에서 전기를 생성할 수 있지만 댐과 같은 저류시설이 필요해 건설비용이 증가한다(Power et al., 2016). 와류발생부에서 난류 흐름을 발생시켜 회전운동으로 전기를 생성시키는 발전시스템이 제시되었다(Zotloeterer, 2008, Rathke et al., 2012). 와류수차내의 와류부는 원통형(cylindrical basin)과 원추형(conical basin)으로 구분한다. Wanchat and Suntivarakorn (2012)는 원통형 와류발생부가 안정적으로 와류를 발생시킨다고 발표하였지만 Dhakal et al. (2015)은 원통형보다 원추형이 와류수차의 효율이 크다고 제시하였다. Jevdjevich and Levin (1953)는 유입 유량을 수직 낙차부 아래로 효과적으로 유도하는 접선식(tangential intake) 와류 유입구를 처음으로 제안하였다. Drioli (1969)는 소형돌이형(scroll intake) 와류 유입형태를 소개하였으며, 수공구조물 내 와류 수직구(vortex drop shaft)를 제시하였다. 와류 유입식은 흐름 회전을 유도하는 유도벽이 있는 나선식(spiral intake)이 있으며 다양한 분야에 활용되고 있다(Kellenberger, 1988). Matsui (2010)는 나선식 와류 유입형태를 와류수차에 적용하여 그 성능을 분석하였다. Odgaard (1986)는 자유수면이 있어 유동거동이 복잡한 와류 내 에어코어와 랭킨와류모형(Rankine vortex model)에 영향을 주는 물리적 매개변수(Froude 수와 와류회전수)를 제시하였다. Mulligan et al. (2014)은 원통형 와류부내 유동해석과 실험연구를 통해 접선방향의 유속분포와 와류에 영향을 주는 매개변수 및 자유수면 형태 변화를 연구하였다. 와류 수차의 와류 강도는 원통형 와류부 내 에어코어 형태와 직경비에 영향을 받는다(Dhakal et al., 2014). Mulligan and Hull (2010)은 원통형 와류부 외부직경에 대한 오리피스 직경의 비율을 0.14~0.18 범위로 제안하였다. Nishi and Inagaki (2017)는 원통형 와류부에서 유동거동이 복잡한 단일 러너 주위의 와류에 대해 유동해석과 실험을 하였다. 와류 수차의 성능은 블레이드 수가 2~4개일 때 증가하였지만(Power et al., 2016) 6~12개의 블레이드에서는 감소하였다(Dhakal et al., 2014). Ullah et al. (2020)는 원추형 와류발생부에서 단일 러너보다 다중 러너의 수차성능이 크다는 사실을 연구하였다. Mulligan and Casserly (2010) 및 Petrasch (2009)는 와류 수차의 효율성을 15~35 % 범위로 제안하였지만 Kourispower와 Zotlöterer와 같은 상업회사는 거의 85 %

까지 효율성을 보고했다.

국내의 경우, 원통형 와류수차 성능에 관한 기초적인 실험연구가 진행 중이다. Choi et al. (2020)은 실험을 통해 단일 러너에서 유출구 직경비 0.17~0.185 범위를 제시하였다. Choi et al. (2021)은 와류 수차 성능에 폴리가 미치는 영향을 실험하였다. 단일 러너의 와류 강도는 와류발생부보다 오리피스 입구에서 높았다(Choi et al., 2022). Kim et al. (2023)은 와류 수심비에 따른 단일 러너의 블레이드를 2엽에서 6엽까지 증가시키면서 와류 수차 성능을 실험하였으며, 평균 출력은 5엽에서 상대적으로 높다는 분석결과를 제시하였다. 국내에서 와류 수차의 성능에 대한 2단 러너에 관한 연구는 수행되고 있지 않았다.

본 연구는 원통형 와류부에서 유량과 러너의 위치 변화에 따른 2단 와류 수차의 성능을 실험하였다. 와류 수차 성능이 상대적으로 높은 5엽을 선택하였으며 각각 5엽으로 구성된 2단 러너를 제작하였다. 2단 와류 수차의 성능에 영향을 주는 토크, 와류 수심, 회전수 및 출력량을 러너 수심비(y/h<sub>v</sub>) 4개 지점에서 측정하였고 단일 러너와 비교 및 분석하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 기본방정식

일반적으로 유량을 낙차로 떨어뜨렸을 때 생산되는 이론 전력(P<sub>in</sub>)은 식 (1)과 같이 정의한다.

$$P_{in} = \rho g H_e Q \quad (1)$$

여기서, ρ는 유체의 밀도(kg/m<sup>3</sup>), g는 중력가속도(m/s<sup>2</sup>), H<sub>e</sub>는 유효낙차(effective head), Q는 유량(m<sup>3</sup>/s)이다.

와류 수차는 유입된 초기 유량을 곡률형태로 이루어진 와류발생부에서 회전시켜 하부로 유출시킨다(Fig. 1).

유효낙차는 와류수차의 두 단면에 대하여 Bernoulli 정리를 적용하면 식 (2)와 같이 나타낸다.

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

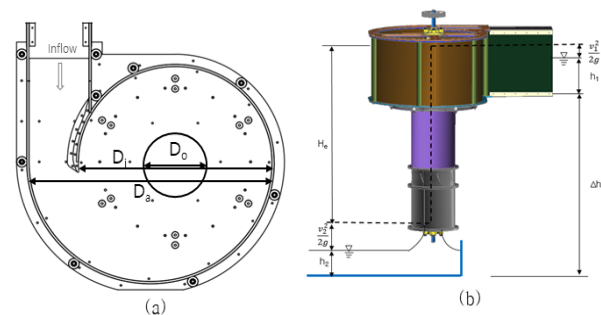


Fig. 1. Schematic of (a) top view and (b) cross-sectional view of vortex turbine(Kim et al., 2023).

여기서,  $H_e$ 는 유효낙차,  $\Delta h$ 는 하류단의 하상으로부터 상류단의 하상까지의 높이,  $h_1$ 은 상류단의 수심,  $v_1$ 은 상류단의 유속,  $h_2$ 는 하류단의 수심,  $v_2$ 는 하류단의 유속이다.

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

$$P_{out} = VI \tag{3}$$

일반적으로 수차는 유체의 운동에너지를 회전축의 회전 운동으로 변환시킨다. 유체 흐름의 각운동량 변화에 따라 회전축의 토크( $T$ )는 유체의 각운동량(angular momentum)의 시간 변화율과 같으며 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = \rho Q(v_1 r_1 - v_2 r_2) = \frac{P_{out}}{\omega} \tag{4}$$

여기서,  $P_{out}$ 는 출력(W),  $T$ 는 토크(N·m),  $\omega$ 는 회전 각속도(rad/s)이다.  $v_1$ 과  $v_2$ 는 단면 1과 2에 작용하는 접선 유속(m/s),  $r_1$ 과  $r_2$ 는 단면 1과 2의 반지름(m),  $\rho$ 는 유체 밀도,  $Q$ 는 유량( $m^3/s$ )이다. 와류 수차(GWVPP, Gravitational Water Vortex Power Plant)에 적용할 경우  $v_1$ 는 와류코어(vortex core) 근처에서 유속(m/s),  $v_2$ 는 블레이드 회전속도(m/s),  $r_1$ 과  $r_2$ 는 와류발생부의 반지름(m)이다(Mulligan and Casserly, 2010).

회전 각속도  $\omega$ (rad/s)는 식 (5)와 같이 나타낸다.

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \tag{5}$$

여기서,  $N$ 은 회전수(rpm)이다. 수차 효율( $\eta$ )은 식 (6)과 같다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{6}$$

출력 결정에 영향을 주는 회전축의 토크측정은 기계적인 효율만을 고려하는 방법과 전기적 손실을 고려하여 측정하는 방법이 있다. 본 연구에서는 블레이드에서 회전축 토크로 전환되는 전기적 손실을 고려한 측정방법으로 평가하였다.

### 2.2 실험장치

와류 수차의 본체는 PC(polycarbonate)로 제작하였으며, 개수로와 연결된 원통형 와류발생부, 유출구, 회전축, 조리기, 러너 및 발전장치로 구성하였다(Fig. 1). 와류발생부 우측에 연결된 개수로는 폭 160 mm, 높이 300 mm, 길이 1500 mm이다. 상부 원통형 와류발생부 입구 폭은 106.73 mm, 높이(H)는 300 mm, 두께는 5 mm, 외부직경( $D_o$ )은 580 mm, 내부직경( $D_i$ )은 470 mm, 유출구 직경( $D_c$ )은 134 mm 및 와류를 발생시키는 하부 유출구 높이는 575 mm이다(Fig.

1(a)). 와류 수차는 와류발생부 저면의 중앙에 유동면적을 조절할 수 있는 조리개를 설치해 자유로운 직경비 변화를 통한 유량 조절이 가능하도록 하였다. 제작된 와류 수차는 만곡형태의 와류발생부로 인해 유입된 유량을 외부로 유출시켜 와류를 더욱 효과적으로 형성할 수 있도록 설계하였다.

Fig. 2와 같이 개수로부터 유입된 유량은 원통형 와류발생부로 흘러 만곡되게 형성된 내측면과 저면을 따라 와류를 형성한다. 와류 형성부재에 의하여 강한 자유수면 소용돌이가 발생하여 와류 수차의 외면과 마찰을 일으키면서 회전축의 러너를 회전시킨다. 와류 수차는 회전축의 회전 운동에 의하여 회전중심축의 상부 풀리(pulley)와 벨트로 결합된 발전기를 회전시켜 전기에너지를 발생시킨다. 이때 풀리 직경(radial of pulley)은 84 mm이다.

와류발생부 상단에 설치된 발전장치는 선엔윈드 에너지사에서 개발한 300 W 하드아노다이징 알루미늄 발전기(Hard Anodizing Aluminum Generator)이다. 회전수는 타코메타(tachometer)로 측정하며, 발전기에서 발생된 교류(AC)를 직류(DC)로 바꾸는 3상 브리지다이오드(MDS50-16)를 사용하였다. 전압과 전류는 디지털 멀티미터(디지털 후크메타 3280-10과 AC/DC 클램프 미터)로 측정하였다. 유입 유량은 블레이드를 설치하지 않은 조건에서 직경비( $D_o/D_a$ )는 0.231, 와류수심( $h_c$ )은 18.5 cm이다.

본 연구에서는 직경 130 mm이고 높이는 80 mm인 비틀린 형태의 러너를 제작하였다. Fig. 3과 같이 2단 러너는 회전중심축(사프트)에 연결하여 상부 풀리(pulley)와 벨트로 결합된 발전기를 회전시킨다.

Fig. 4는 와류발생부에서 2단 러너의 위치를 나타낸다. 러너 수심비( $y/h_c$ )는 수직방향으로 4개 지점이다.  $y$ 는 하단 러너를 기준으로 와류발생부의 바닥으로부터 연직거리이며,  $h_c$ 는 러너가 없는 상태에서 와류수심을 말한다. 와류 수차의 러너는 접선방향 유속을 고려하여 러너 수심비( $y/h_c$ ) 0.054,



Fig. 2. Experimental apparatus(Choi et al., 2021).

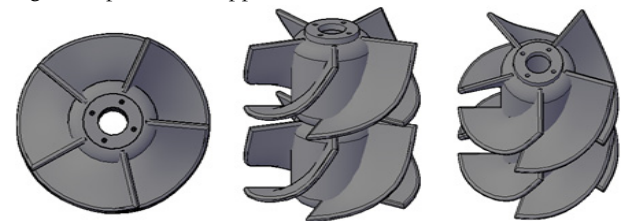


Fig. 3. 3D schematic drawing of two-stage runners with twisted blade profiles.

0.108, 0.162, 0.232 지점에 설치하였다. 물리적 매개변수(와류 수심, 회전수, 토크, 전압, 전류, 출력 등)는 오리피스 입구근처 4개 지점에서 2단 러너의 위치를 변화시키면서 측정하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 2단 러너의 와류 수심

Fig. 5는 유입 유량과 2단 러너의 위치 변화에 따른 와류 발생부의 와류 수심(vortex height)을 측정한 결과이다. 유

입 유량은 0~8 L/s 범위이며, 러너는 수심비( $y/h_v$ ) 0.054, 0.108, 0.162, 0.232 지점에 설치하였다.  $y$ 는 와류발생부 바닥으로부터 연직거리이며,  $h_v$ 는 러너가 없는 상태에서 와류 수심이다. 2단 러너의 와류 수심은 유입유량이 증가할수록 증가하였다. 2단 러너의 평균 와류 수심은 수심비 0.054, 0.108, 0.162, 0.232 지점에서 각각 16.3 cm, 17.3 cm, 17.8 cm, 18.8 cm로 증가하였다(Fig. 5(a)). 평균 와류 수심은 유입유량과 러너의 위치에 영향을 받는다. 유입 유량 증가에 따른 와류 유동 내 에어코어(air core) 증가로 자

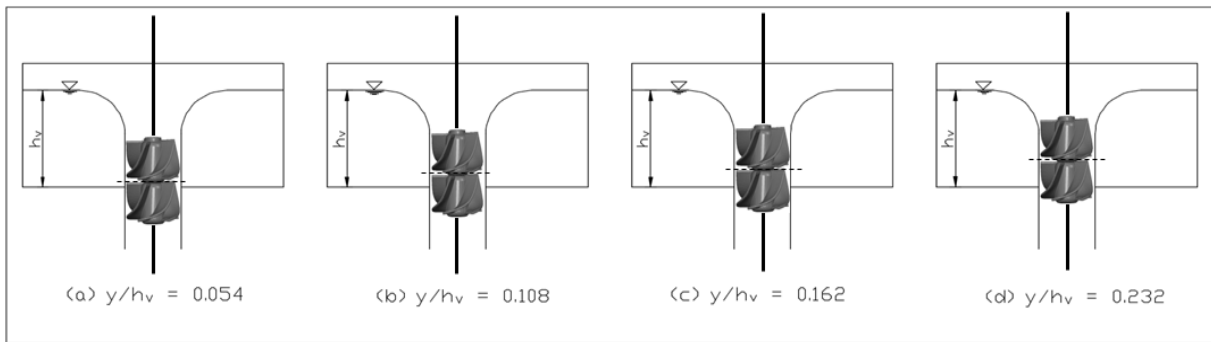


Fig. 4. Submergence conditions for two-stage runners in vortex chamber.

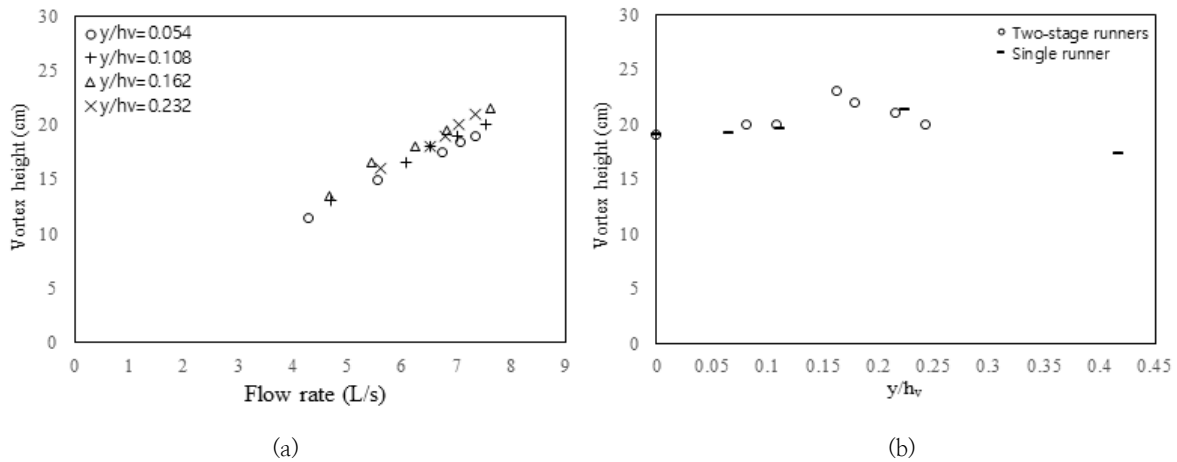


Fig. 5. Variation of vortex height in the vortex chamber with increasing (a) flow rate and (b) runner depth ratio.

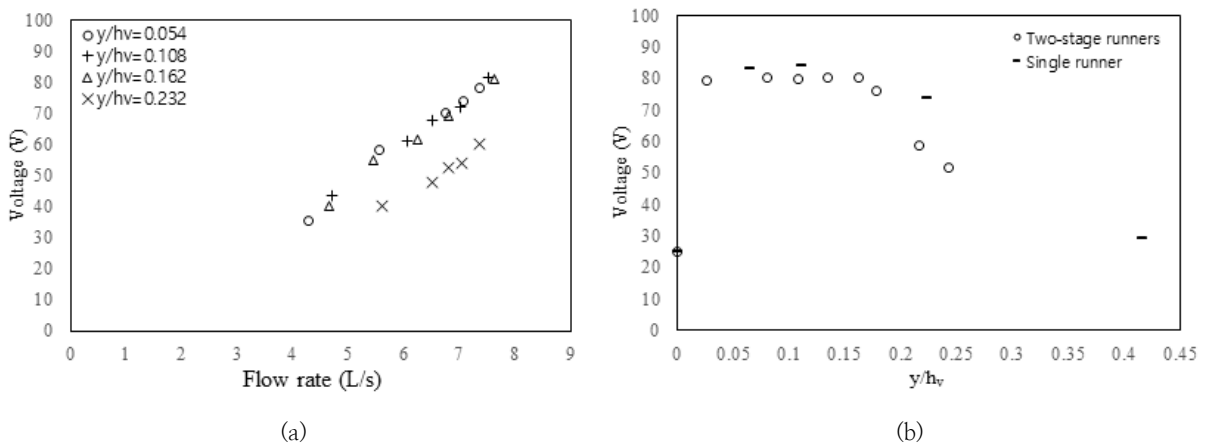


Fig. 6. Voltage variation with varying (a) flow rate and (b) runner depth ratio.

유표면에서 유출구까지 공동현상이 발생하였다. Fig. 5(b)는 러너 수심비(runner depth ratio)에 따른 2단 러너와 단일 러너의 와류 수심을 비교하였다. 와류 수차의 성능에 영향을 주는 와류 수심은 동일한 유량 조건에서 단일 러너보다 2단 러너에서 약간 높게 나타난다. 2단 러너의 와류 수심은 러너 수심비 0.162 지점까지 증가하다가 감소하는 경향을 보인다.

### 3.2 2단 러너의 전압과 전류

와류수차의 전압은 유입 유량과 러너 수심비( $y/h_v$ ) 변화에 따라 측정하였다(Fig 6). Fig 6(a)과 같이 전압은 유입 유량이 증가할수록 증가하였다. 2단 러너의 평균 전압은 러너 수심비 0.054, 0.108, 0.162 및 0.232 지점에서 각각 63.2 V, 65.1 V, 61.3 V, 50.9 V이다. 유량증가에 따른 전

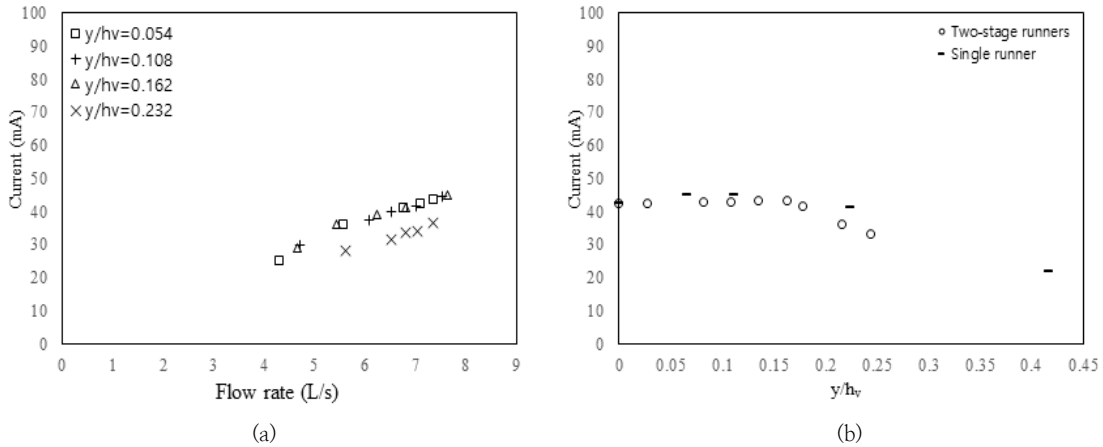


Fig. 7. Current variation with varying (a) flow rate and (b) runner depth ratio.

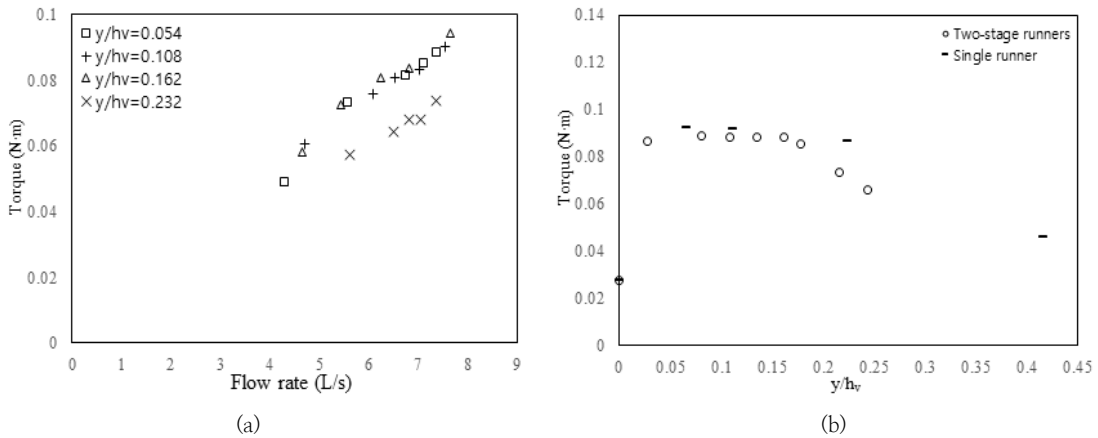


Fig. 8. Torque variation with varying (a) flow rate and (b) runner depth ratio.

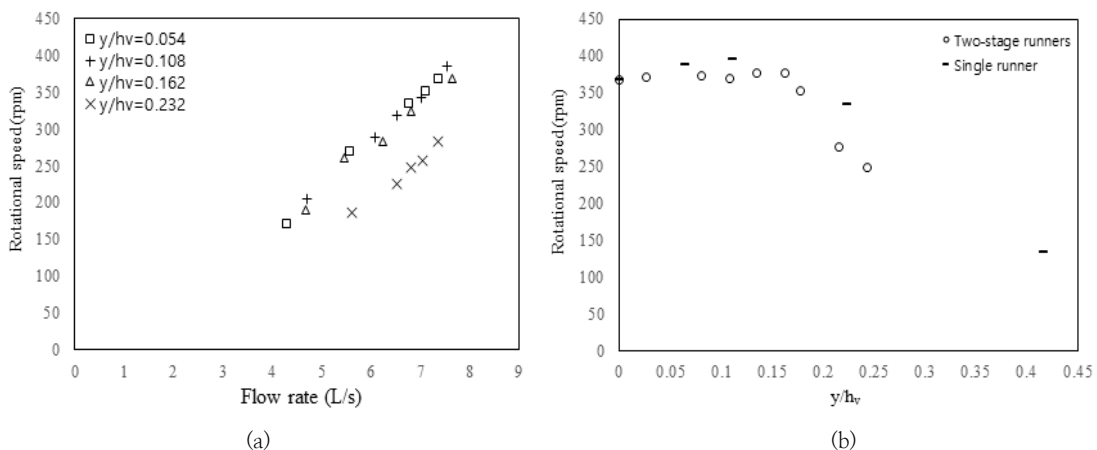


Fig. 9. Variation of rotational speed with varying (a) flow rate and (b) runner depth ratio.

압은 러너 수심비 0.162 지점부터 감소하였다. 2단 러너의 전압은 오리피스 근처로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다. 2단 러너의 전압은 단일 러너와 같이 러너 수심비 0.162 지점까지 일정하다가 감소하였으며, 비슷한 경향을 보인다(Fig. 6(b)).

전류는 전압과 같이 유입 유량이 증가할수록 증가한다(Fig 7(a)). 2단 러너의 평균 전류는 수심비 0.054, 0.108, 0.162, 0.232 지점에서 각각 37.6 mA, 38.7 mA, 38 mA, 32.7 mA이다(Fig. 7(a)). 전류는 유입 유량의 영향을 받으며 러너 수심비 0.232 지점보다 0.054~0.162 범위에서 증가하였다. Fig. 7(b)과 같이 2단 러너의 전류도 오리피스 근처로부터 멀어질수록 감소하였다. 2단 러너의 전류는 단일 러너와 같이 러너 수심비 0.054~0.162 범위에서 일정한 값을 보이다가 감소하였다.

### 3.3 2단 러너의 토크와 회전수

Fig. 8은 유입 유량과 러너의 위치변화에 따라 측정된 토크를 나타낸다. 토크는 유입 유량과 상대 위치 변화에 따라 전압, 전류 및 회전수를 측정하여 결정하였다. 토크는 유입 유량이 증가할수록 증가한다(Fig. 8(a)). 토크는 유입 유량이 변화할 때 러너 수심비 0.054~0.162 범위에서 비슷한 값을 보였지만 러너 수심비 0.232 지점부터 급격히 감소하였다. 2단 러너의 평균 토크는 러너 수심비 0.054, 0.108, 0.162, 0.232 지점에서 각각 0.075 N·m, 0.078 N·m, 0.078 N·m, 0.066 N·m이다. 2단 러너의 토크는 오리피스 근처인 러너 수심비 0.108과 0.162 지점에서 증가하였다. 2단 러너의 토크는 단일 러너와 같이 비슷한 경향을 보였으며, 러너 수심비 0.162 지점부터 감소하였다(Fig. 8(b)).

Fig. 9는 유입 유량과 러너의 상대 위치 변화에 따른 회전수와 관계곡선을 도시했다. 2단 러너의 평균 회전수는 수심비 0.054, 0.108, 0.162, 0.232 지점에서 각각 300 rpm, 308 rpm, 285 rpm, 239 rpm이다. Fig. 9(a)와 같이 회전수는 유입 유량이 변화할 때 러너 수심비 0.054~0.108 범위에서 300 rpm 이상 값을 보였지만 러너 수심비 0.232 지점부터 239 rpm으로 급격히 감소하였다. Fig. 9(b)와 같이 2단 러너의 회전수는 오리피스 근처로부터 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다. 2단 러너의 회전수도 단일 러너와

같이 일정한 값을 유지하다가 러너 수심비 0.162 지점부터 감소하였다.

### 3.4 효율

Table 1은 유량과 러너의 위치변화에 따른 2단 와류 수차(two-stage vortex turbine)와 단일 와류 수차(single-stage vortex turbine)의 효율을 나타낸다. 유효 낙차를 고려한 이론 전력( $P_m$ )이 출력( $P_{out}$ )보다 상대적으로 높게 나타난다. 유효 낙차를 고려한 이론 전력 범위는 48~54 W인 반면 와류 수심과 전기적 손실을 고려한 전력은 2~3.7 W 범위이다. Table 1에 표시한 바와 같이 전기적 출력( $P_{out}$ )은 동일한 조건에서 2단 러너와 단일 러너의 전압과 전류를 측정하여 결정하였으며, 2단 러너의 평균 전압, 전류, 토크 및 회전수는 단일 러너보다 약간 높다. 2단 러너와 단일 러너의 평균 효율은 각각 6.29 %와 6.01 %이며(Fig. 10(a)), 또한 이들 러너의 평균 토크는 각각 0.087 N·m와 0.084 N·m이다. Fig. 10(b)은 와류 수심비( $y/D$ ) 변화에 따른 접선방향의 유속을 나타낸다.  $y$ 는 와류발생부 바닥으로부터 연직거리이며  $D$ 는 2단 러너에서 와류 수심이다. 접선 방향의 유속은 오리피스 근처에서 일정하지만 멀어질수록 증가하는 경향을 보인다. 그 이유는 러너가 유출구 근처에서 와류와 흐름 접촉 면적이 증가하기 때문에 접선방향의 유속이 감소하는 것으로 판단된다. 현장에 적용 전 와류와 2단 러너 블레이드사이 흐름 접촉 면적이 최대가 되도록 와류 발생부의 외부와 내부직경 조절이 요구된다.

Fig. 11은 러너 수심비가 증가함에 따라 2단 러너와 단일 러너의 전압, 전류, 회전수 및 출력을 나타낸다. 동일한 러너 수심비 조건에서 2단 러너의 평균 회전수, 평균 전압, 평균 전류 및 평균 출력은 단일 러너보다 각각 9.25 rpm, 2.1 V, 0.9 mA 및 0.16 W의 편차를 나타낸다. 출력의 가장 큰 차이는 0.162의 러너 수심비( $y/h_v$ )에서 관찰되었다. 동일한 지점에서 2단 러너와 단일 러너 간에 출력 편차는 0.34 W이지만 본 연구에서는 9:1의 축척으로 모형을 제작하여 실험하였으므로 실제크기 조건에서 2단 러너와 단일 러너 간에 출력 격차는 743 W를 초과하는 것으로 추정된다. 흐름 접촉 면적이 2단 러너에서 와류와 러너 블레이드사이 상호 작용으로 단일 러너보다 증가했기 때문인 것으로 판단된다.

Table 1. Efficiency and power with increasing relative position of runners.

Runner type	Voltage (V)	Current (mA)	$N$ (rpm)	$P_{out}$ (W)	$v_1$ (m/s)	$v_2$ (m/s)	$Q$ (L/s)	$H_c$ (m)	$P_m$ (W)	$\eta$ (%)	$y/h_v$
Two-stage VT	78.0	43.9	369	3.42	0.22	0.74	7.35	0.679	48.99	6.99	0.054
	81.6	44.5	385	3.63	0.21	0.75	7.53	0.694	51.25	7.08	0.108
	80.9	45.0	368	3.64	0.21	0.76	7.64	0.699	52.29	6.96	0.162
	60.0	36.5	283	2.19	0.20	0.65	7.36	0.735	53.04	4.13	0.232
Single-stage VT	79.0	43.5	364	3.43	0.23	0.72	7.60	0.686	51.12	6.72	0.054
	79.3	44.0	370	3.49	0.22	0.75	7.63	0.688	51.47	6.78	0.108
	76.8	43.0	363	3.30	0.20	0.71	7.33	0.711	51.11	6.46	0.162
	57.0	35.8	271	2.04	0.21	0.66	7.28	0.698	49.87	4.09	0.232

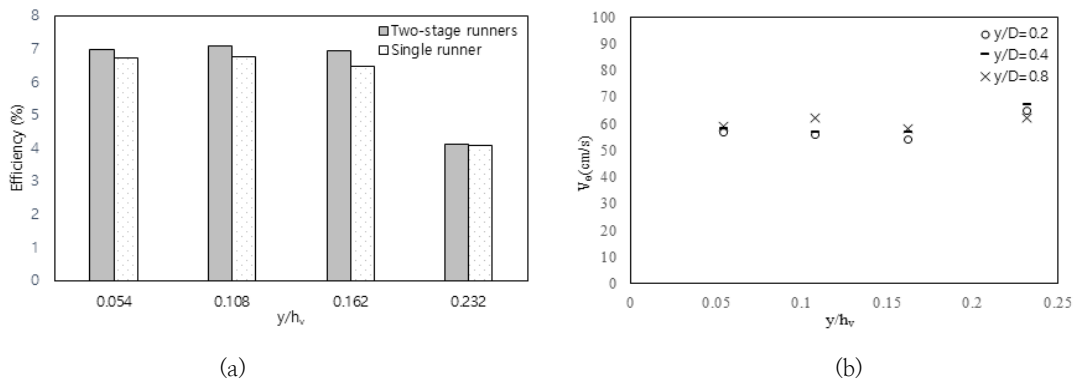


Fig. 10. Variation of (a) efficiency and (b) tangential velocity with increasing runner depth ratio.

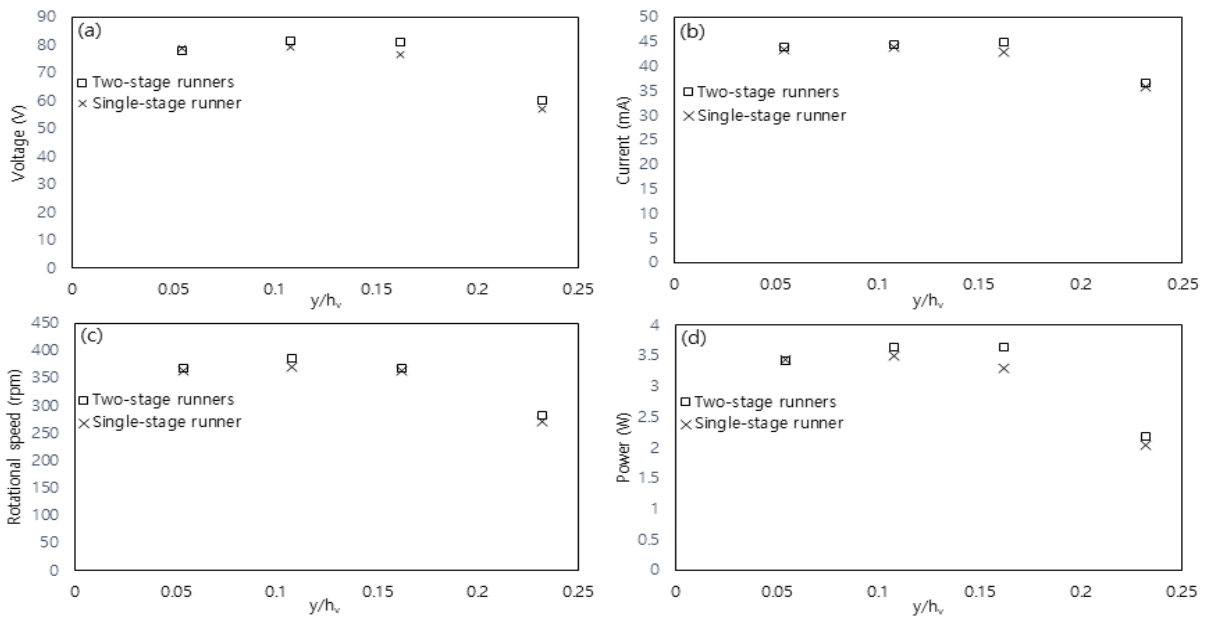


Fig. 11. Variation of (a) voltage, (b) current, (c) rotational speed and (d) power with increasing runner depth ratio.

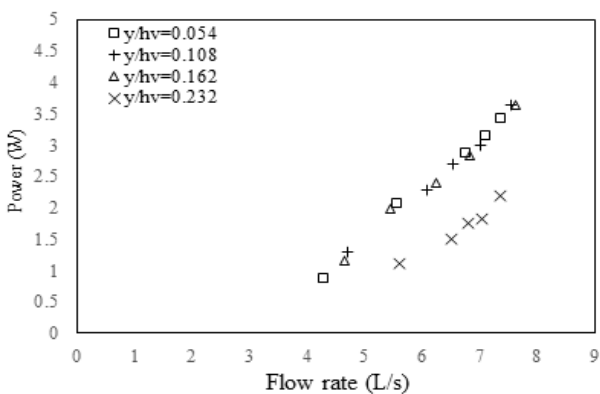


Fig. 12. Relationship between power of two-stage runners and different flow rates with increasing runner depth rate.

Fig. 12는 유량변화에 따른 2단 와류 수차의 출력을 나타낸다. 출력은 원통형(cylindrical basin) 와류발생부에서 러너 수심비 변화에 관계없이 유량이 증가함에 따라 증가하였다. 2단 와류수차의 경우 출력은 러너 수심비 0.054~

0.162 지점에서 높게 나타난다. 즉 유체가 좁은 출구로 유출될 때 출력과 효율은 오리피스 근처 러너 수심비 0.054~0.162 지점에서 증가하는 것을 볼 수 있으며 유출구로부터 멀어지는 러너 수심비 0.232 지점에서 감소하였다.

이런 결과는 유출구 지점에서 최대 동수두가 발생하였고 와류와 접촉 면적이 단일 와류 수차보다 2단 와류수차에서 증가했기 때문인 것으로 사료된다. 2단 와류수차를 현장에 적용시 유량은 최대로 하고 러너 수심비 0.054~0.162 지점에서 결정해야한다고 판단한다.

### 4. 결론

국내의 경우, 자유수면을 갖는 와류 수차의 성능에 대한 2단 러너에 관한 연구는 수행되고 있지 않은 상태이다. 본 연구는 갯벌을 파괴하지 않고 해양 생태계를 보존할 수 있는 친환경적인 에너지생산에 기여할 수 있는 마이크로 와류 수차에 관한 것이다. 유량과 러너 수심비 변화에 따른 2단 와류 수차의 성능을 연구하였다. 2단 러너를 제작하였으며,



동일한 조건에서 유량과 러너의 위치변화에 따라 토크, 와류 수심, 전압, 회전수, 전류 및 출력 등을 측정하여 효율을 비교 및 분석하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 자유수면 와류가 발생하는 2단 와류 수차의 와류 수심은 유량과 러너의 위치에 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 와류 수심은 유량이 증가할수록 증가하지만 러너 수심비 0.162 지점까지 증가하다가 감소하였다.

2) 2단 와류 수차의 전류, 회전수 및 전압은 유량이 증가함에 따라 증가하며, 오리피스 근처로부터 멀어질수록 감소하였다. 2단 와류 수차의 회전수, 전류와 전압은 같은 조건에서 단일 와류 수차보다 높게 나타난다.

3) 2단 와류 수차의 토크는 유입 유량이 증가함에 따라 증가하며, 러너 수심비 0.054~0.162 범위에서 일정하다가 감소하였다. 동일한 조건에서 2단 와류 수차의 토크는 단일 와류 수차보다 약간 높게 나타난다.

4) 실제 효율은 유량과 러너의 수심비에 영향을 받는다는 사실을 확인하였다. 효율이 10 %이내 이지만 2단 와류 수차가 단일 와류 수차보다 약간 높게 나타난다. 그 이유는 단일 러너보다 2단 러너 블레이드와 와류와의 접촉 면적이 증가했기 때문이다. 실제 현장에 적용 시 2단 러너 수심비는 0.054~0.162 지점에서 결정하는 것이 타당하다고 판단된다.

본 연구결과는 실제 현장에서 와류 수차를 설계 및 시공할 경우 기초자료로 활용될 것으로 기대한다. 향후 최적화된 마이크로 와류 수차 설계를 위해서는 다양한 물리적 인자에 대한 실험적 연구가 지속적으로 필요하다.

## 사 사

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

## References

- 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, Nakarmi, S, Pun, P, Thapa A. B and Bajracharya, T. R (2014). Development and testing of runner and conical basin for gravitational water vortex power plant, *Journal of the Institute of Engineering* 10, pp. 140–148.
- 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 (1969). Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a vortice, *L'Energia Elettrica*, 66(6), pp. 399–409. [Italian literature]
- IEA (2015). Energy Technology Perspectives 2015 (ETP 2015)
- Jevdjovich, V and Levin, L (1953). Entrainment of air in flowing water and technical problems connected with it. *Proceedings of the Minnesota International Hydraulics Convention*, ASCE.
- Kellenberger, M. H (1988). Wirbelfallschichte in der Kanalisationstechnik. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich*, pp. 1–367 [German literature].
- Kim, JW, Choi, IH and Chung, GS (2023). Effect of Blade Number Variations on Performance of Micro Gravitational Vortex Turbine in Free Water Surface. *J. of Wetlands Research*, 25(3), pp.176–183. [Korean literature]  
[DOI <https://doi.org/10.17663/JWR.2023.25.3.176>]
- Matsui, J (2010). Internal flow and performance of the spiral water turbine, *Turbomachinery*, vol. 38, no. 6, pp. 358–364. [<https://doi.org/10.1155/2017/2610508>]
- 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.
- Mulligan, S, Casserly, J and Sherlock, R (2014). Hydrodynamic investigation of free-surface turbulent vortex flows with strong circulation in a vortex chamber. *Proceedings of the 5th IAHR International Junior Workshop on Hydraulic Structures*. Spa, Belgium, 28–30 August. [<https://popups.uliege.be/ijrewhs2014/index.php?id=168>]
- Mulligan, S and Hull, P (2010). Design and Optimisation of a Water Vortex Hydropower Plant, Undergraduate thesis, Institute of Technology Sligo, Ireland.
- 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>]
- 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)]
- Petrasch, K (2009). Fischwanderhilfe zur Überwindung unterschiedlich hoher Wasserlinien zwischen Wasserzulauf und Wasserablauf an künstlichen Wasserstauwerken. Germany, Patent DE102009026000A1. 18 June. [German literature]
- 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/JOET.2016. V4.263]
- Rathke, J, Zotloeterer, F and Wendeland, M (2012). Kleinwasserkraftwerk mit Gravitationswirbel. BWK – Das Energie-Fachmagazin 3-2012, Seite 18-21, Springer Velag.[<https://pm-energie.webnode.com/products/kleinwasserkraftwerk-mit-gravitationswirbel-wasserkraft>]
- 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]
- Wanchat, S and Suntivarakorn, R (2012). Preliminary Design of a Vortex Pool for Electrical Generation. *J. of Computational and Theoretical Nanoscience*, vol. 13, no. 1, pp. 173-177. [DOI: 10.1166/asl.2012.3855]
- Zotloeterer, F (2004). Hydroelectric Power Plant. Patent WO 2004/061295A3,2004.
- Zotloeterer, F (2008). Hydroelectric Power Station. Patent WO 2008/141349.