

저낙차에서 와류발생부를 구비한 마이크로 소수력에 관한 실험 연구

최인호·김종우[†]·정기수^{*}

서일대학교 토목공학과

*한국생산기술연구원/(주)한중에너지네트웍스

Experimental Study of Micro hydropower with Vortex Generation at Lower Head Water

In-Ho Choi·Jong-Woo Kim[†]·Gi-Soo Chung^{*}

Department of Civil Engineering, Seoil University, Seoul, Korea

^{*}Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)/Hanjung Energy Networks Co., Ltd.

(Received : 08 May 2020, Revised : 20 May 2020, Accepted : 20 May 2020)

요약

본 논문은 자유수면을 가지는 와류유동 내 저낙차에서 마이크로 소수력에 관한 실험 연구이다. 내부 곡선 모서리가 있는 직선, 곡선, 비틀린 블레이드의 와류 높이, 터빈 회전 및 토크를 개수로 유입구의 유량 0.0069 m³/s 조건에서 측정하였다. 실험결과로서 최적의 와류 강도는 와류 발생부의 외부직경과 유출구 직경 비율 0.17~18.5 범위에서 발생했다. 직선 블레이드 출력과 효율은 다른 블레이드와 비교하여 높게 나타났다. 가장 높게 생성된 에너지는 12.33 W이고, 토크는 0.91 N·m이다. 유효낙차를 고려한 경우 가장 높은 효율은 29.5 %인 반면 와류 높이를 고려한 가장 높은 효율은 회전수 132 rpm에서 80.5 %이다. 직선 블레이드의 와류 유속은 개수로 유입구의 평균 유속보다 약 2.8배 더 크게 나타난다.

핵심용어 : 와류, 마이크로 소수력, 저낙차, 블레이드, 와류 높이

Abstract

This paper described a laboratory investigation of micro hydropower at lower head water in a free vortex flow. The vortex height, turbine rotation and torque for straight blade with inner curved edge, twisted blade and curved blade were investigated at the flow rate of 0.0069 m³/s in the inlet channel. The results showed that the optimum vortex strength occurred within the range of the diameter of basin to the outlet diameter ratios of 0.17~18.5. The power output and efficiency of straight blade were higher as compared to other blades. The highest amount of generated energy was 12.33 W, the torque was 0.91 N·m and the highest efficiency by considering effective head was 29.5 %, whereas the highest efficiency by considering vortex height was 80.5 % at the rotational speed of 132 rpm. The water vortex velocity of straight blade was about 2.8 times larger than the mean velocity in the inlet channel.

Key words : Vortex, Micro hydropower, Low head water, Blade, Vortex height

[†] 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) & Hanjung Energy Networks Co., Ltd. / Principal Researcher (gschung@kitech.re.kr)

1. 서 론

수력 발전은 방대한 물을 담을 수 있는 호수 또는 저수지를 필요로 한다. 서해안 대규모 조력발전소 건설은 심각한 환경파괴 문제가 대두하고 있다. 대형 방조제를 세워 바닷물을 인위적으로 가두기 때문에 갯벌 파괴 등 해양 생태계에 큰 영향을 끼친다. 최근에 주목받는 소수력 발전(small hydropower)은 친환경적이고 청정에너지이다. 이는 구조가 간단하고, 저낙차 및 저유량에 적용 가능하며 설치도 용이하다. 또한 정부의 신재생에너지 보급정책에 따른 지역에너지 보급사업, 2030년 발전량의 20%를 재생에너지로 대체한다는 신재생에너지 공급의무화제도(RPS) 도입 등 소수력 발전의 전망이 증폭되고 있다. 소수력 발전은 하천, 농업용 저수지 등에 저장된 물을 이용할 뿐만 아니라 하수종말처리장, 하수처리장, 수도용 관로, 화력발전소의 냉각수, 산간지역의 기존시설물인 상부댐, 양수발전소 하부댐 등을 활용할 수 있다. 특히 어패류를 양식한 물을 바다로 버리는 육상양식장에도 소수력 발전을 적용할 수 있다.

소수력 발전은 0.1 MW 이하까지 생산할 수 있는 마이크로 소수력(micro hydropower), 0.1~1.0 MW를 발전할 수 있는 미니소수력(mini hydropower), 1.0~10MW를 발전하는 소수력(small hydropower)으로 구분한다. 소수력 발전 수차는 충력(impulse)에 의한 충동형 수차와 반작용(reaction)에 의한 반동형 수차로 나눈다. 충력(impulse)에 의한 충동형 수차는 일반적으로 펠톤 수차와 횡류형 수차이며, 반작용(reaction)에 의한 반동형 수차는 프로펠러 수차(propeller turbine)와 카프란 수차가 해당된다. 고낙차에 적용 가능하도록 기존에 개발된 수차로는 카프란 수차, 프란시스 수차, 횡류형 수차, 펠톤 수차 등이 있다. 하지만 저낙차, 저유량, 다양한 지형, 환경적 요건 등을 충족시키기 위해서는 마이크로 소수력 발전시스템의 개발이 요구된다.

마이크로 소수력 시스템 중에서 와류를 이용하는 수차(GVHP, Gravitation Vortex Hydropower)가 개발되었다(Zotloeterer, 2004, 2011). GVHP는 소형돌이 흐름을 발생시켜 운동에너지를 생성할 수 있다(Rathke et al., 2012; Dhakal, 2017). Drioli (1969)는 나선형 와류 발생부를 결정하는 방법을 제시하였다. 이와 같은 시스템은 댐과 같은 저류시설이 필요 없기 때문에 경제적이며, 저낙차 0.7~3 m에서 전력을 생산할 수 있다(Gheorghe-Marius and Tudor, 2013; Wanchat and Suntivarakorn, 2012; Yaakob et al., 2014). 특히 물고기를 안전하게 통과시킬 수 있어 친환경적이고 유속과 유량 조건에 따라 5~100 kW 전력을 생산할 수 있다(Mohanan, 2016; Yaakob et al., 2014). Singh and Nestmann (2009)은 터빈 효율을 결정하기 위해 최적화된 와류 흐름에 관한 실험을 하였다. Shabara et al. (2015)은 유동해석(CFD) 방법으로 미니 소수력에 대한 와류부 본체의 흐름형태를 분석하였다. Power et al. (2016)은 초저유량에서 블레이드 수 변화에 따른 기계적 출력과 효율을 실험하였으며, 와류발생부 형태, 유입유량, 터빈의

위치 및 블레이드 수와 형상에 영향을 받는다는 사실을 증명하였다. Wardhana et al. (2019)은 와류를 고려하여 유동해석(CFD) 방법으로 프로펠러의 적용성을 분석하였다. 많은 실험연구에서 제시한 와류 수차의 효율성은 15~35%이다(Mulligan and Casserly, 2010; Petrasch, 2009). Kourispower 및 Zotlöterer와 같은 상업 회사는 거의 85%까지 효율성을 보고했지만 이러한 주장은 실험적으로 검증되어야 한다. 와류부가 구비된 소수력은 구조가 간단하지만 와류부에 자유수면이 있어 유동거동이 복잡하며(Odgaard, 1986; Hager, 1985; Mulligan et al., 2014) 다양한 조건에서 최적화된 시스템에 관한 연구가 필요하다. 효율에 영향을 주는 물리적 인자(블레이드 형태, 블레이드 크기, 와류높이, 회전수, 토크 등)에 대한 연구도 요구된다. 국내에서 와류를 이용한 마이크로 소수력 시스템에 관한 연구는 전무한 상태다.

본 연구는 와류부를 고려한 저낙차와 저유량에서 기계적 출력에 영향을 주는 물리적 매개변수(토크, 회전수, 블레이드 형태, 수차 제동력, 와류 높이, 직경비 등)에 대해 실험하였다. 이를 위해 와류 발생부를 구비한 실험기를 제작하였다. 여기에 와류 발생부 하부의 직경을 조절할 수 있는 조리개와 3가지 블레이드를 부착하였다. 직경비에 따른 와류변화와 3가지 종류 블레이드를 비교 분석을 통해 토크, 회전수, 효율, 출력량을 실험하였다.

2. 연구방법

2.1 수력과 기계적 출력

일반적으로 이론전력(P_m)은 식 (1)과 같이 나타낸다.

$$P_m = \rho g H_e Q \quad (1)$$

여기서 ρ 는 유체 밀도, g 는 중력가속도(m/s^2), H_e 는 유효낙차(effective head), Q 은 유량(m^3/s)이다. 와류를 이용하는 수차는 저낙차에서 이론전력의 유효낙차(H_e)대신 와류높이(h_v)를 사용한다(Power et al., 2016).

와류 발생부가 존재하는 마이크로 소수력의 발전 원리는 초기 유량이 유입되어 유출구를 통하여 외부로 유출되기 전까지 일정시간 수용되도록 와류 발생부에 의하여 전기를 발생시킨다(Fig. 1). 유입된 유량은 만곡되게 형성된 와류 발생부에서 회전하여 하부로 유출되도록 되어 있다. 즉 와류 발생부의 수용 공간으로 유입되는 유량은 소용돌이를 발생시키면서 외부로 유출된다.

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

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

여기서 Δh 는 하류단의 하상으로부터 상류단의 하상까지의

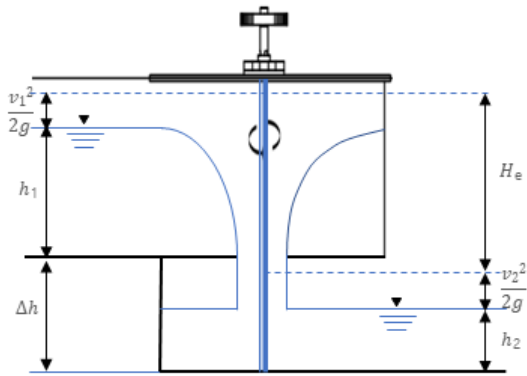


Fig. 1. Energy diagram for water vortex power plant

높이, h_1 은 상류단의 수심, v_1 은 상류단의 유속, h_2 는 하류단의 수심, v_2 는 하류단의 유속이다.

블레이드의 기계적 출력 P_{out} 은 토크 $T(N \cdot m)$ 와 마이크로 소수력 발전기의 회전 각속도 ω (rad/s)의 곱으로 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{out} = T \cdot \omega \tag{3}$$

추가적으로 수차 효율(η)은 식 (4)와 같다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \tag{4}$$

본 연구에서는 기계적 출력 결정을 위해 회전축의 토크 측정 기법을 사용하였다. 회전축 토크를 측정하는 방법은 전기적 손실을 무시하며 블레이드에서 회전축 토크로 전환되는 기계적 효율만을 평가할 수 있다.

2.2 실험장치

개수로와 연결된 원형 상부 와류 발생부는 외부 발생부, 내부 발생부, 유입구 및 유출구로 구성된다(Kleinschroth, 1972). PC(polycarbonate)로 제작된 실험기의 상부 회전체 높이(H)는 300 mm, 두께는 5 mm, 외부직경(D_a)은 580 mm, 내부직경(D_i)은 470 mm, 와류를 발생시키는 하부 유출구 높이는 575 mm이다(Fig. 2).

개수로는 폭 160 mm, 높이 300 mm, 길이 1500 mm이다(Fig. 3). 유량은 상부 원형 와류 발생부의 입구($b = 106.73$ mm)로 유입되어 와류 발생부의 내부로 흐른다. 유입된 유량은 와류 발생부의 만곡되게 형성된 내측면과 저면을 따라 와류를 형성한다. 이와 같은 와류흐름은 수차의 외면과 마찰을 일으키면서 블레이드를 돌려 수차에 연결된 회전축을 회전시키게 된다. 회전축의 회전 운동에 의하여 회전축의 단부와 연결된 발전기에 의하여 전기를 발생시킨다. 발생한 전기는 별도 축전기에 축전된 후, 필요한 곳에 공급하게 될 것이다. 와류 발생부 저면의 중앙에 유출구 직경을 조절할 수 있는 조리개를 설치해 자유롭게 직경비 변화에 따른 출력을 측정하도록 하였다.

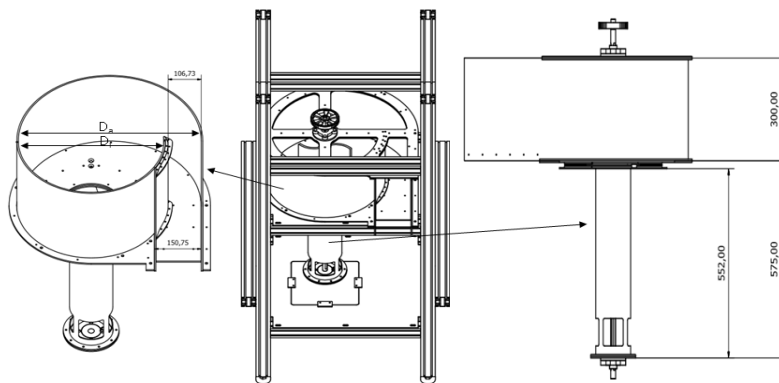


Fig. 2. 3D schematic drawing of the vortex chamber and the outlet



Fig. 3. Configuration of experimental setup

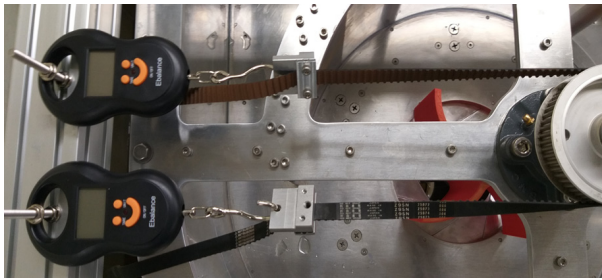


Fig. 4. Torque transducer

Fig. 3과 같이 와류 발생부의 내부로 유입된 유량은 유출구를 통하여 외부로 유출되는데, 유입된 유량이 유출되면서 와류 형성부재에 의하여 소용돌이가 발생된다. 제작된 실험기는 유입된 유량을 외부로 유출시켜 와류발생부 내부에 와류를 더욱 효과적으로 형성할 수 있도록 설계하였다.

와류 발생부 내에 설치된 블레이드의 기계적 출력은 회전축의 토크와 회전수로 결정할 수 있다. Fig. 4와 같이 상부 회전체 축에 연결된 두 개의 전자 저울을 통해 회전축 토크를 측정하였으며(Grote and Feldhusen, 2005), 회전수는 타코메타(tachometer)로 측정하였다. 풀리(pulley) 직경은 84 mm이다.

본 연구는 기계적 출력과 효율을 측정하기 위해 3가지 블레이드 형태를 채택하였으며, 와류의 형성과 강도에 영향을 미치는 수차의 블레이드 크기 및 모양을 다르게 설계 및 제작하였다(Fig. 5). 곡선 블레이드(curved blade)의 직경과 높이는 각각 220 mm와 150 mm이다. 하부에 내부 곡선 모서리가 있는 직선 블레이드(straight blade)와 비틀린 블

레이드(twisted blade) 직경은 200 mm이고 높이는 150 mm로 제작하였다.

3. 실험결과

3.1 상대직경에 따른 에어코어와 와류 높이

Fig. 6은 상부 회전체의 외부 직경(D_o)과 하부 출구부의 직경(D_a)에 따른 와류형태 변화를 측정된 결과이다. 동일한 유입유량 $0.0069 \text{ m}^3/\text{s}$ 에서 직경비(D_o/D_a) 변화에 따라 와류 발생부에서 와류 유동(vortex flow)이 발생하였다. 직경비가 증가함에 따른 와류 높이(h_v)가 감소하는 경향을 보였고 와류 폭은 증가하였다. 이때 와류 높이는 직경비(D_o/D_a) 0.172에서 가장 높게 나타났다(Fig. 6). 직경 변화에도 불구하고 와류 상부 폭은 거의 비슷하였지만 와류 유동 내 에어코어(air core)의 직경은 증가하였다. 점차적으로 강한 에어코어가 나타나는 경향을 보였다. 즉 와류 강도에 따라 자유 표면에서 유출구까지 공동현상이 발생하였다.

Fig. 7은 비틀린 블레이드(twisted blade)에서 와류 높이 변화를 실험하였다. 유입유량은 $0.0069 \text{ m}^3/\text{s}$ 이며, 직경비(D_o/D_a)는 0.172, 0.198, 0.232이다. 비틀린 블레이드에서 와류 높이는 직경비(D_o/D_a) 0.172, 0.198, 0.232에서 각각 0.22 m, 0.20 m, 0.18 m로 감소하였다. 유출구 변화에 따라 유속도 변화하였다. Fig. 7(a)와 같이 직경비 0.172 조건에서 수로 내 평균 유속은 0.169 m/s, 와류부 근처에서 유속은 0.52 m/s로 증가하였다. 직경비 0.198에서 수로 내 평균유속과 와류부 근처의 유속은 각각 0.194 m/s, 0.64

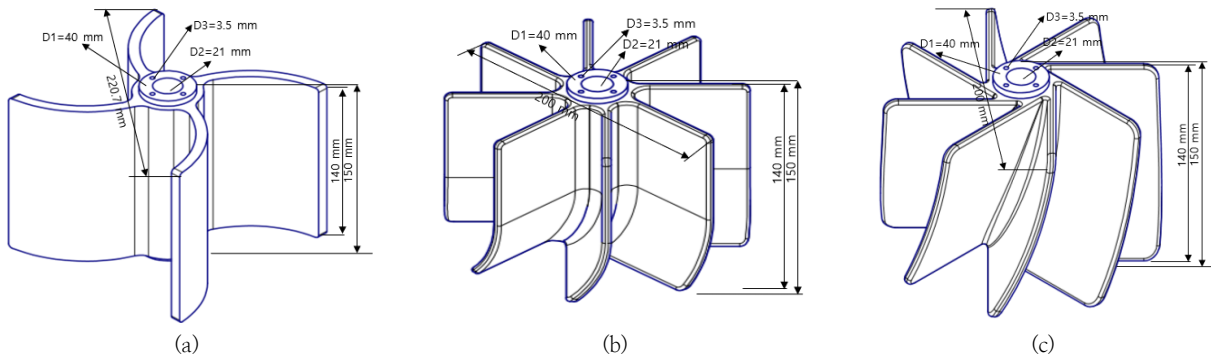
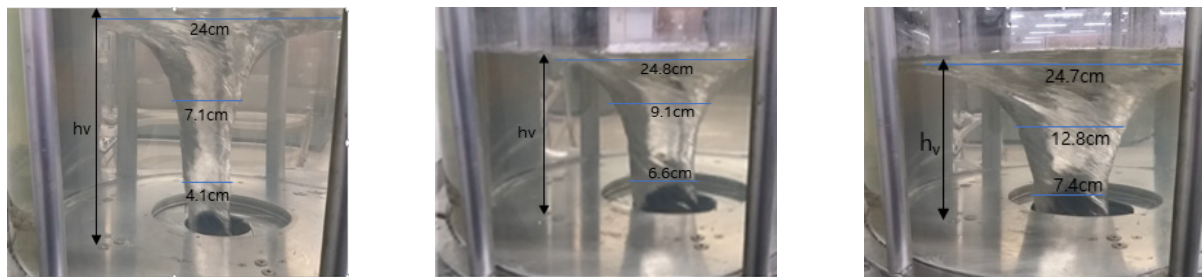


Fig. 5. 3D Inventor model of three different runners with (a) curved, (b) straight, (c) twisted blade profiles



(a) $D_o/D_a=0.172(h_v=23.5\text{cm})$ (b) $D_o/D_a=0.198(h_v=19.8\text{cm})$ (c) $D_o/D_a=0.232(h_v=17.7\text{cm})$

Fig. 6. Vortex air core in the vortex chamber with increasing diameter ratios

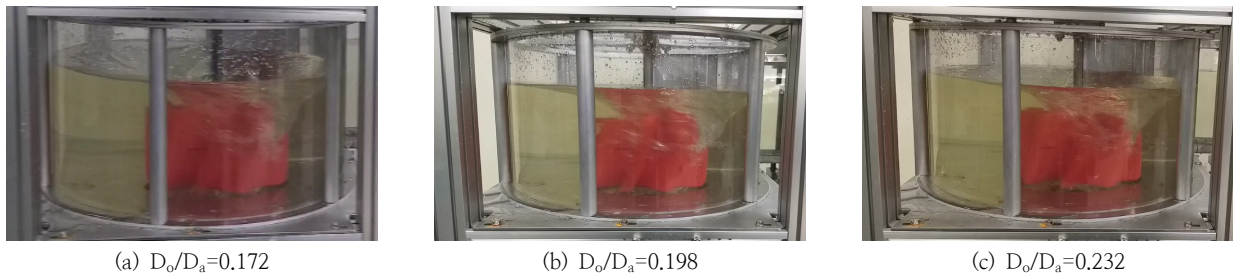


Fig. 7. Vortex shape for twisted blade with varying diameter ratios

m/s이고(Fig. 7(b)), 직경비 0.232 조건에서 수로 내 평균 유속과 와류부 근처의 유속은 각각 0.212 m/s, 0.66 m/s이다(Fig. 7(c)). 실험 결과 직경비가 증가할수록 와류부 유속은 증가함을 볼 수 있다. 즉 와류부 유속은 비틀린 블레이드에서 개수로의 유입구보다 3배 이상 증가하였다. 다른 블레이드에서도 유속 변화와 와류 높이는 비슷한 경향을 보였다.

3.2 블레이드에 따른 토크와 회전수

Table 1은 유입유량 0.0069 m³/s에서 3가지 블레이드의 형태와 와류부 유출구 지름이 변화할 때 측정된 토크, 회전수(RPM), 수차 제동력, 와류 높이를 나타낸다. 회전축에 연결된 폴리 반지름은 42 mm이다. 블레이드 형태와 상관없이 직경비가 증가할수록 수차 제동력과 토크는 급격히

Table 1. Parameters for curved blade (CB), straight blade (SB) and twisted blade (TB) with increasing diameter ratios (F_L = left mass indicated by digital spring, F_R = right mass, F = turbine braking force (N), T = torque, $N(\text{rpm})$ = rotation speed, h_v = Vortex height)

Run No.	Diameter ratios (D_o/D_a)	$F_L(\text{kg})$	$F_R(\text{kg})$	$F(\text{N})$	$T(\text{N}\cdot\text{m})$	$N(\text{rpm})$	$h_v(\text{m})$	Blade profile
s ₁	0.172	3.50	1.90	15.69	0.659	123	0.22	CB
s ₂	0.184	3.30	1.20	20.60	0.865	122	0.21	
s ₃	0.198	1.69	0.06	15.99	0.671	121	0.20	
s ₄	0.232	2.90	1.10	17.66	0.742	115	0.18	
s ₅	0.172	2.90	0.70	21.58	0.906	130	0.24	SB
s ₆	0.184	7.10	5.10	19.62	0.824	132	0.21	
s ₇	0.198	5.90	4.00	18.63	0.782	133	0.21	
s ₈	0.232	5.30	3.70	15.69	0.659	136	0.18	
s ₉	0.172	1.58	0.07	14.76	0.620	135	0.22	TB
s ₁₀	0.184	2.26	0.95	12.85	0.530	140	0.21	
s ₁₁	0.198	1.74	0.41	13.05	0.550	146	0.20	
s ₁₂	0.232	1.47	0.20	12.46	0.523	148	0.18	

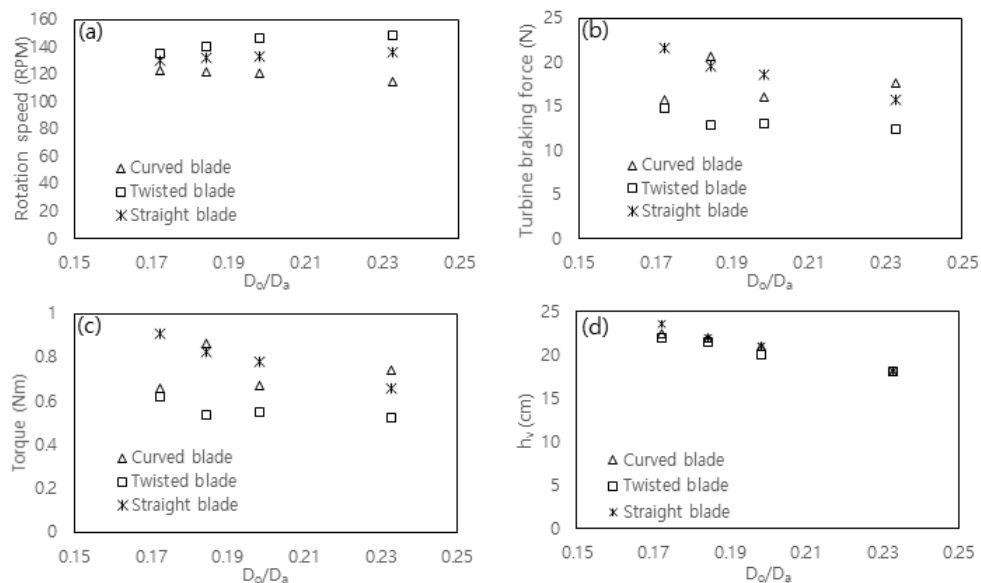


Fig. 8. Comparison of (a) rotation speed, (b) force, (c) torque and (d) vortex height with varying diameter ratios

증가한 후, 특정 지점에서 재차 감소하는 경향을 보였다. 각 경우에 대한 토크 및 수차제동력 곡선의 첨두 부분을 다음 Table 1에 정리하여 제시했다.

Fig. 8은 직경비와 각각 회전수, 수차 제동력, 토크 및 와류 높이의 관계 곡선을 도시했다. 곡선 블레이드(CB)의 직경비 0.184를 제외하면 회전수와 토크는 반비례 관계임을 나타낸다. 직선 블레이드(SB)와 비틀린 블레이드(TB)의 최대 토크는 직경비 0.172에서 발생한 반면 CB의 최대 토크는 직경비 0.184에서 나타났다. 하부 지점이 약간 꺾인 직선 블레이드(SB)의 토크는 곡선 블레이드(CB)와 비틀린 블레이드(TB)보다 높게 나타난다. 비틀린 블레이드(TB)의 회전수가 곡선 블레이드(CB)와 직선 블레이드(SB)보다 높지만 토크 값이 가장 작게 나타나는 경향을 보였다. 곡선 블레이드(CB)는 다른 두 개의 블레이드보다 회전수가 가장 낮게 보였지만 직선 블레이드(SB)와 비슷한 토크 값을 나타낸다.

Table 1과 같이 제작된 와류 발생부 내 토크는 블레이드 종류와 상관없이 직경비 0.17~0.185 범위에서 증가하였다. 직선 블레이드와 비틀린 블레이드에서 직경비가 감소하면 회전수는 감소하지만 와류 높이와 토크가 증가하는 경향을 보였다.

3.3 와류부에서 발전효율과 발전량

Table 2는 블레이드의 형태와 와류부 유출구 지름이 변화할 때 측정된 기계적 출력(P_{out}), 이론 전력(P_{in}), 유효 낙

차(H_e), 효율(η)을 나타낸다. 효율(η_1)은 식 (4)로 산정하였으며, 유효 낙차를 고려한 이론 출력을 적용하였다.

유효 낙차는 각각의 블레이드와 직경비 변화에 따라 개수로 내 평균 유속, 하류부에서 유속과 수심을 측정하여 결정하였다. 효율(η_2)은 이론 출력 결정 시 와류 높이를 사용하였다. 블레이드의 형태와 상관없이 기계적 출력은 직경비에 따라 변화하였다. 기계적 출력은 CB와 SB의 경우 직경비 0.184에서 증가한 반면 TB 조건에서는 직경비 0.172에서 발생했다. 유효 낙차와 와류 높이를 고려한 이론 전력은 S_5 의 경우 직경비 0.172에서 가장 큰 값을 나타낸다. 실제 현장에 적용시 직경비는 0.17~0.185 범위에서 결정하는 것이 타당하다고 사료된다.

Fig. 9는 3가지 블레이드에 따른 직경비와 전력을 나타낸다. 유효 낙차를 고려한 이론 전력(P_{in})이 와류 높이를 적용한 이론 전력(P_{in2})보다 상대적으로 높게 나타난다. 그 이유는 유효 낙차에 조절 가능한 하류단 하상으로부터 상류단 하상까지의 높이를 고려했기 때문이며, 현장에 적용 전 그 타당성에 대한 분석이 요구된다. 유효 낙차를 고려한 이론 전력 범위는 34~43.5 W인 반면 와류높이에 따른 이론 전력은 12~15.1 W 범위이다. 앞서 언급한 바와 같이 기계적 출력(P_{out})은 3가지 블레이드에 대한 직경비 변화에 따라 토크를 측정하여 결정하였으며, 그 범위는 7.9~12.5 W이다. SB의 기계적 출력이 CB와 TB의 출력보다 높게 나타난다.

Fig. 10은 직경비 0.172 조건에서 SB, CB, TB의 기계적

Table 2. Power and efficiency of three different runners with increasing diameter ratios($\eta_1(\%) = P_{out}/P_{in1}$, $\eta_2(\%) = P_{out}/P_{in2}$)

Run No.	Diameter ratios (D_o/D_a)	P_{out} (W)	P_{in1} (W) with H_e	P_{in2} (W) with h_v	η_1 (%)	η_2 (%)	Q (m^3/s)	H_e (m)	Blade profile
s ₁	0.172	8.49	38.20	14.97	22.2	56.7	0.0069	0.561	CB
s ₂	0.184	11.05	37.40	14.55	29.5	75.9	0.0070	0.539	
s ₃	0.198	8.50	35.59	13.59	23.9	62.6	0.0069	0.523	
s ₄	0.232	8.93	34.59	12.51	25.8	71.4	0.0070	0.498	
s ₅	0.172	12.33	43.27	17.52	28.5	70.4	0.0076	0.580	SB
s ₆	0.184	11.38	38.62	14.15	29.5	80.5	0.0068	0.573	
s ₇	0.198	10.89	39.33	15.07	27.7	72.3	0.0073	0.548	
s ₈	0.232	9.38	34.51	12.16	27.2	77.2	0.0069	0.510	
s ₉	0.172	8.76	39.39	14.96	22.2	58.5	0.0068	0.582	TB
s ₁₀	0.184	7.90	39.37	14.29	20.1	55.4	0.0068	0.582	
s ₁₁	0.198	8.37	37.42	13.72	22.4	61.0	0.0069	0.545	
s ₁₂	0.232	8.10	34.33	12.27	23.6	66.0	0.0069	0.503	

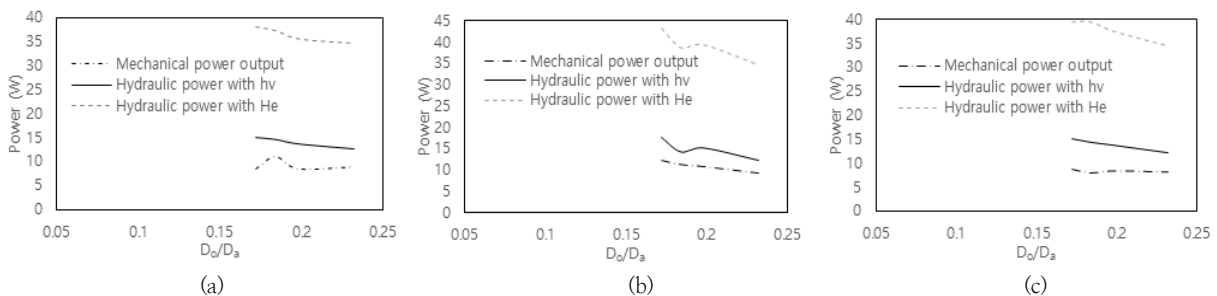


Fig. 9. Relation power and diameter ratios with (a) curved blade, (b) straight blade and (c) twisted blade

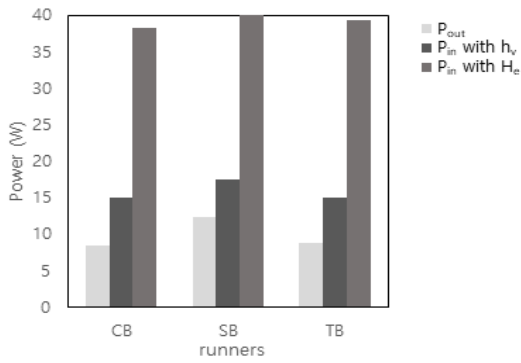


Fig. 10. Power of three different runners with (a) curved blade (CB), (b) straight blade (SB) and (c) twisted blade (TB) ($D_o/D_a=0.172$)

출력과 이론 전력을 나타낸다. CB와 TB의 기계적 출력은 각각 8.49 W(S_1)와 8.76 W(S_9)인 반면 SB의 출력은 12.33 W(S_5)으로 증가하였다. 이때 이론 출력은 동일한 조건일 경우 SB에서 43.27 W(S_5)로 가장 크게 나타났으며, CB에

서 38.2 W(S_1)와 TB에서 39.39 W(S_9)이다.

Fig. 11은 3가지 블레이드 형태에 대한 직경비와 효율 관계곡선을 도시했다. 유효 낙차를 고려할 경우 효율 범위는 20~30 %인 반면 와류 높이를 적용하면 효율이 55~81 % 범위로 증가하는 경향을 보였다. 즉 와류 발생부 아래의 높이는 실제 와류 거동에 영향을 주지 않기 때문에 와류 높이만 고려할 경우 효율은 SB에서 최대 80.5 %까지 증가하였다. 전력에 대한 효율은 CB와 SB일 경우 직경비 0.184에서 증가하였고 TB는 직경비 0.232에서 증가하였다. SB의 평균효율이 CB와 TB보다 높게 나타난다.

Table 3과 Fig. 12는 직경비 변화, 곡선(CB), 직선(SB), 비틀린 블레이드(TB)의 출력에 영향을 주는 물리적 인자의 변화 범위와 기계적 출력을 나타낸다. TB의 회전수와 회전 각속도가 다른 블레이드보다 높게 나타났다. CB는 회전수와 회전 각속도 범위가 낮게 나타난다. SB의 회전수와 회전 각속도는 TB보다 낮지만 토크와 힘은 높게 측정되었다. 특히 SB가 다른 블레이드(CB, TB)보다 기계적 출력이 높게

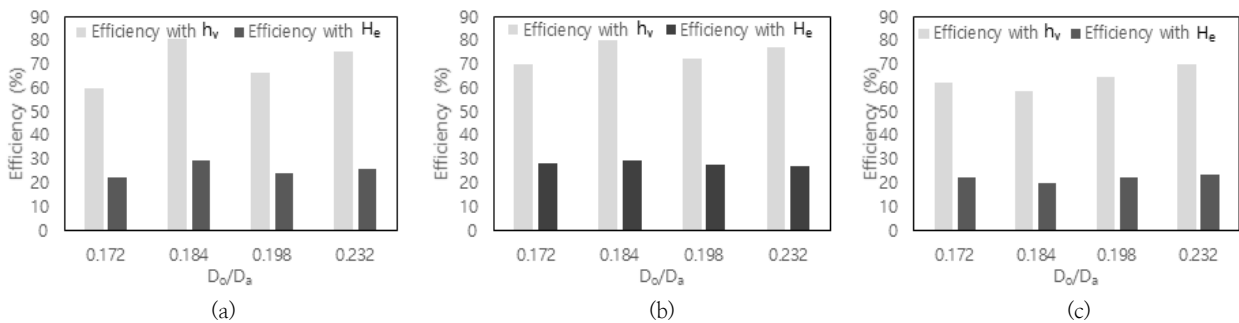


Fig. 11. Relation efficiency and diameter ratios with (a) curved blade (CB), (b) straight blade (SB) and (c) twisted blade (TB)

Table 3. Experimental parameters for blade profile(ω = angular speed)

Experimental parameters	Blade profile		
	CB	SB	TB
RPM	115 ~ 123	130 ~ 136	135 ~ 148
ω (rad/s)	12.0 ~ 12.9	13.6 ~ 14.2	14.1 ~ 15.5
Mass (kg)	1.6 ~ 2.1	1.6 ~ 2.2	1.2 ~ 1.5
Force (N)	15 ~ 21	15.6 ~ 21.6	12.4 ~ 14.8
T (N·m)	0.65 ~ 0.87	0.65 ~ 0.91	0.53 ~ 0.62
P_{out} (Watts)	7.9 ~ 11.1	8.9 ~ 13	8.2 ~ 8.8

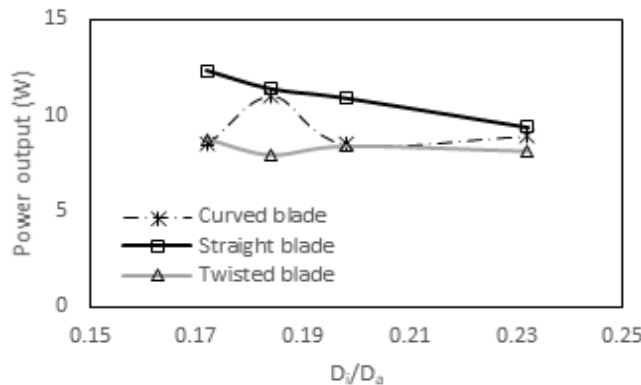


Fig. 12. Relation power output and diameter ratios with curved blade (CB), straight blade (SB) and twisted blade (TB)

나타난다. 그 이유는 CB와 TB의 블레이드 형태는 와류의 회전력에 의해 거동되지만 SB의 블레이드 형태는 하부 지점에 내부 곡선 모서리가 있어서 와류의 회전력뿐만 아니라 출구지점으로 유출되는 유동력 영향도 받기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구는 자유수면을 가지는 와류 발생부에서 마이크로 소수력에 영향을 주는 물리적 인자에 관한 실험이다. 이를 위해 와류발생부가 존재하는 실험장치와 3가지 수차 블레이드를 제작하였다. 유출구 직경을 조절할 수 있는 조리개를 와류 발생부에 설치하고 직경비 변화에 따른 토크를 측정하였다. 또한 각기 다른 형태로 제작된 3가지 수차 블레이드의 기계적 출력, 이론적 전력 및 효율을 비교 분석을 통해 기계적 출력에 대한 토크, 회전수, 와류높이의 영향을 실험하였다. 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 제작된 실험기의 와류 발생부에서 유출구 직경비 변화에 따라 와류크기가 다양하게 발생하였다. 직경비가 감소할수록 와류 높이는 증가하였지만 와류의 에어코어는 감소하였다. 반대로 직경비가 증가할수록 와류 높이는 감소하였지만 와류의 에어코어는 증가하였다. 따라서 직선 블레이드(SB)의 기계적 출력은 와류 높이가 증가할 때 증가하였다.

2) 비틀린 블레이드(TB) 조건에서 와류부의 유속은 개수로 내의 평균 유속보다 3배 이상 높게 나타난다. 토크와 와류 높이는 3가지 블레이드 조건하에 직경비 0.17~0.185 범위에서 증가하였다. 즉 기계적 출력은 직경비에 영향을 받으므로 실제 현장에 적용 시 직경비는 0.17~0.185 범위에서 결정하는 것이 타당하다고 판단된다.

3) 하부에 곡선 모서리가 있는 직선 블레이드(SB)의 기계적 출력은 곡선 블레이드(CB)와 비틀린 블레이드(TB)의 전력보다 높게 나타난다.

4) 실제 효율은 와류 높이를 고려한 이론 전력과 비교하면 56~81 % 범위이며, 에너지방정식에 의해 산정된 이론 전력과 비교할 경우 20~30 %로 감소하였다.

본 연구는 깃발을 파괴하지 않고 해양 생태계를 보존할 수 있는 친환경적인 에너지생산에 기여할 것으로 기대된다. 수행한 와류와 직경비 변화에 따른 기계적인 출력에 대한 분석은 실제 현장에 와류 수차를 적용할 경우 기초적인 자료로 사용할 수 있을 것으로 예상된다. 하지만 최적화된 마이크로 소수력 발전을 위해 다른 물리적 인자에 대한 연구가 지속적으로 요구된다. 좀 더 명확한 와류 발생부 내 유동해석뿐만 아니라 유량변화, 회전수변화 및 블레이드 위치 변화에 따른 효율, 전력량에 대한 실험적 분석이 필요하다.

사 사

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

References

- Dhakal, R (2017). Computational and experimental investigation of runner for gravitational water vortex power plant. *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)*, vol. 373, pp. 363. <https://doi.org/10.1109/ICRERA.2017.8191087>
- Drioli, C (1969). Esperienze su installazioni con pozzo di scarico a vortice, *L'Energia Elettrica*, 66(6), pp. 399-409. [French literature]
- Gheorghe-Marius, M and Tudor, S (2013). Energy capture in the gravitational vortex water flow. *J. of Marine Technology & Environment* vol 1. <http://worldcat.org/issn/18446116>
- Grote, KH, and Feldhusen, J (2005). *Dubbel Taschenbuch für den Maschinenbau*. 21. Auflage *Springer Verlag* Berlin Heidelberg. <https://www.springer.com/de/book/9783642388910>
- Hager, WH (1985). Head-discharge relation for vortex shaft. *J. of Hydraulic engineering*. 111(6), pp. 1015-1020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1985\)111:6\(1015\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1985)111:6(1015))
- Kleinschroth, A (1972). *Stromungsvoegange im Wirbelfallschacht*. Mitteilung des Institutes fuer Hydraulik und Gewaesserkunde, TU Muenchen, Nr. [German literature]
- Mohanan, A (2016). Power Generation with Simultaneous Aeration using a Gravity Vortex Turbine. *International J. of Scientific & Engineering Research*, vol. 7, no. 2, pp. 19-24. <https://www.ijser.org/onlineResearchPaperViewer.aspx>
- 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>
- 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))
- 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/JOCET.2016.V4.263](https://doi.org/10.7763/JOCET.2016.V4.263)
- Rathke, J, Zotloeterer, F and Wendeland, M (2012). Kleinwasserkraftwerk mit Gravitationswirbel. BWK – Das Energie–Fachmagazin 3–2012, Seite 18–21, *Springer Verlag*. <https://pm-energie.webnode.com/products/kleinwasserkraftwerk-mit-gravitationswirbel-wasserkraft/>
- 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>
- Singh, P and Nestmann, F (2009). Experimental optimization of a free vortex propeller runner for micro hydro application. *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 33, no. 6, pp. 991–1002. <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2009.04.007>
- 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](https://doi.org/10.1166/asl.2012.3855)
- 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](https://doi.org/10.12962/j25481479.v3i3.4864)
- Yaakob, OB, Ahmed, YM, Elbatran, AH and Shabara HM (2014). A Review on Micro Hydro Gravitational Vortex Power and Turbine Systems. *J. Teknologi*. 69(7), pp. 1–7. <https://doi.org/10.11113/jt.v69.3259>
- Zotloeterer, F (2004). Hydroelectric power plant. Patent WO 2004/061295A3,2004.
- Zotloeterer, F (2011). Das Gravitationswasserwirbelkraftwerk. Zement und Beton 3/11, Zement + Beton Handels- u. Werbege.m.b.H., Wien. [German literature]