자유수면 와류에서 마이크로 소수력의 성능에 풀리가 미치는 영향 분석

최인호·김종우⁺·정기수*

서일대학교 토목공학과 *한국생산기술연구원/(주)한중에너지네트웍스

Effect Analysis of Pulley on Performance of Micro Hydropower in Free Surface Vortex

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 : 06 July 2021, Revised : 22 July 2021, Accepted : 22 July 2021)

요약

본 논문은 자유수면을 갖는 와류수차의 성능에 풀리의 영향을 이해하는 것이다. 실험은 개수로 유입구 유량 0.0069 ~ 0.0077 m³/s 범위에서 물리적 인자(와류높이, 유속, 유효낙차 등)에 따른 수차의 회전수, 전압 및 전류를 측정해 분석하였다. 실험결과에 따르면 와류수차의 전압, 전류 및 회전수는 블레이드 형태와 상관없이 풀리비가 증가할 경우 감소하였다. 직선형 블레이드와 비틀린 블레이드의 효율은 풀리비 0.45 지점에서 52 %인 반면 소형 비틀린 블레이드 의 효율은 풀리비 0.21 지점에서 54 %이다. 와류수차의 최대 발전량은 풀리비 0.5 지점 내에서 발생했다. 와류수차의 효율은 풀리비에 따라 0.2 ~ 58 % 범위에서 관찰되었다.

핵심용어 : 와류수차, 자유수면 와류, 블레이드, 풀리

Abstract

This paper contributes to the understanding of the effect of pulley on the performance of the vortex turbine in free water surface. The experimental work was to analyze the rotation, voltage and current of the turbine due to physical factors (vortex height, velocity, effective head, etc.) at flow rates ranging from 0.0069 to 0.0077 m³/s in the inlet channel. As a result, the experimental values showed that voltage, current and rotational speed of the vortex turbine decreased with increasing the pulley ratio regardless of the blade type. The efficiency of straight blade and twisted blade was 52 % at the gear ratio of 0.45, whereas the efficiency of small twisted blade was 54 % at the pulley ratio of 0.21. The highest amount of the energy generated by the water free vortex turbine occurred within a pulley ratio of 0.5. The efficiency of this vortex turbine was observed at $0.2 \sim 58$ % depending on the pulley ratio.

Key words : Vortex turbine, Free surface vortex, Blade, Pulley

^{*}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

오늘날 화석연료 사용에 따라 배출되는 탄소의 감축을 위한 에너지정책 전환의 필요성이 요구되고 있다. 정부는 이에 부응 해 2050년까지 탄소 배출 제로시대, 신재생에너지개발 등 다 양한 정책의 입안을 가속화하고 있다. 이에 따라 태양광, 조력, 풍력, 수력 등에 대한 연구가 집중되고 있다.

일반적으로 수력발전은 고낙차가 유리한 바, 이에 맞추어 댐 입지를 개발하게 되면, 생태계 훼손, 침식, 침전물 등과 같은 환경문제가 발생한다. 서해안 조력발전의 경우에서도 대형방 조제로 인한 갯벌 파괴 등 해양 생태계에 영향을 끼치는 것으 로 알려져 있다.

이에 비하여 신재생에너지의 한 일환인 마이크로 소수력 발 전은 댐 건설 등과 같은 대규모 토목공사를 진행하지 않아 자 연환경을 크게 해치지 않으면서 발전이 가능하다. 기존에 개발 된 수차(카프란 수차, 프란시스 수차, 횡류형 수차, 펠톤 수차 등)는 3 m 이상 유효낙차와 많은 유량이 필요하다(Nicolet et al., 2011; Vu et al., 2011). 하지만 마이크로 소수력 발전은 구조가 간단하여 저낙차 및 적은 유량의 하천, 육상양식장, 농 업용 저수지, 하수종말처리장, 하수처리장, 수도용 관로, 화력 발전소의 냉각수 등과 같은 곳에서도 안정적인 전기생산이 가 능하다. 친환경적인 점이 장점이기 때문에 마이크로 소수력 발 전은 적극적인 연구와 개발이 필요하다. 이런 가운테 마이크로 소수력 발전의 기술개발에서 에너지 변환효율 즉, 발전성능을 높이는 방향으로 연구가 집중될 필요가 있다.

마이크로 소수력 발전시스템에서 와류수차(vortex turbine) 는 저유량과 저낙차에서 100 kW까지 에너지를 생성할 수 있 기 때문에 신재생에너지 기술 분야에서 주요 연구 관심사가 되었다(Zotloeterer, 2004; Gheorghe-Marius and Tudor, 2013). 자유수면 와류를 이용한 수차는 와류와 중력 때문에 유출구로 낙하할 때 공기가 유입한다(Mulligan et al., 2016). 와류는 수차 회전을 증가시키고 용존 산소량을 높여 수질을 개선시킬 수 있다. 어류를 안전하게 하류로 통과시키며 발전할 수도 있어 친환경적 발전시스템에 해당한다(Müller et al., 2018; Wagner et al., 2019). Wanchat and Suntivarakorm (2012)는 소용돌이가 발생하는 와류발생부 내 유출구의 직경 에 대해 연구를 하였다. Power et al. (2016)는 와류를 이용하 는 수차의 전력효율은 블레이드의 크기와 형상에 영향을 받는 다는 사실을 밝혔다. 임펠러 주위의 유동장과 공기 유입면적에 대해 연구한 Nishi and Inagaki (2017)는 축회전이 증가할수 록 순방향 흐름영역은 증가하고 공기 유입면적은 감소한다는 사실을 증명하였다. 와류부 내 흐름에 대한 유동해석(CFD)도 Shabara et al. (2015), Mulligan et al. (2016), Müller et al. (2018), Wardhana et al. (2019), Powalla et al. (2021) 등 의 해 이루어졌다. 국내에서 와류수차에 대한 연구가 미흡한 가운 데 Choi et al. (2020)은 와류부를 고려한 기계적 출력에 영향 을 주는 물리적 매개변수(토크, 블레이드 형태, 직경비 등)에 대해 연구하였는데, 여기서 유출구의 직경비 범위를 제시하였 다. 사실 다양한 조건에서 와류흐름에 관한 연구가 진행되었지

만 단순한 와류부 구조에도 불구하고 자유표면 흐름으로 인해 그 분석이 쉽지 않고 복잡하다(Odgaard, 1968; Nishi and Inagaki, 2017). 와류수차 성능에 영향을 주는 물리적 인자에 대한 연구는 아직도 활발히 진행 중이다.

본 연구에서는 자유수면을 갖는 와류수차의 성능에 대해 중 점적으로 실험하였다. 풀리비가 수차성능에 어떤 영향을 주는 지 물리적 인자(회전수, 유속, 수위, 와류 높이, 유효낙차 등) 를 중심으로 측정하였다. 이를 위해 4개 풀리를 제작하였고 3 개 블레이드를 채택하였다. 와류수차의 전압과 전류는 영구자 석 발전기인 하드아노다이징 알루미늄 발전기(Hard Anoding Aluminum Generator)를 사용하였으며, 풀리비와 블레이드에 따른 효율과 출력을 측정해 분석하였다.

2. 연구방법

2.1 이론 및 발전기출력

와류수차의 발전원리는 자유표면이 존재하는 와류를 이용하 는 것이다. Fig.1과 같이 초기유량은 개수로를 통해 유입되며, 유입부와 연통된 와류 발생부에서 일정 시간동안 회전 후 중 력의 영향 아래 유동부로 유출된다. 와류 발생부의 수용 공간 으로 유입되는 유량은 소용돌이를 발생시키면서 회전축을 회 전시킨다. 이때 회전축의 회전 운동에 의하여 회전축의 단부와 연결된 발전기에서 전기를 발생시킨다.

유효낙차는 유입부와 유출구 내 단면사이 Bernoulli 정리를 적용하면 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$H_e = \Delta h + H_1 - H_2 \tag{1}$$

윗 식에서 △h는 하류단 하상으로부터 상류단 하상까지 높 이(m), *H*₁은 상류단 와류바닥을 기준으로 측정된 에너지, *H*₂ 은 하류단 와류바닥을 기준으로 측정된 에너지를 의미한다.

일반적으로 이론 출력(P_{in})은 유량과 유효낙차를 고려하면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$P_{in} = \rho g Q H_e \tag{2}$$

윗 식에서 ρ는 유체 밀도(kg/m³), g는 중력가속도(m/s²), *Q* 은 유량(m³/s), *H*_e는 유효낙차(m)이다.

발전기 출력(*P_{out}*)은 전류(I)와 전압(V)의 곱으로 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$P_{out} = I \bullet V \tag{3}$$

와류수차 효율(η)은 식 (4)와 같다.

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \tag{4}$$

본 연구는 발전기 출력을 결정하기 위해 선앤윈드에너지사 에서 개발한 300 W 하드아노다이징 알루미늄 발전기(Hard Anoding Aluminum Generator)를 사용하였다. 2019년도 한



Fig. 1. (a) Energy plan of the vortex chamber and (b) vortex air core in free surface vortex.



Fig. 2. Comparison of power output and power input.

국기계전기전자시험연구원은 기계적 입력전력과 발전기 출력 을 비교 분석하였다(Fig. 2). 발전기 효율은 회전속도(r/min)에 따라 30.6 ~ 78.8 % 범위이다.

2.2 실험기와 발전장치

본 연구는 Choi et al. (2020)에 의해 제시된 와류 발전장치 를 사용하였다. 와류 발전장치 유입구는 개수로와 연결하였다. 개수로의 폭은 160 mm, 높이는 300 mm, 길이는 1500 mm 이다(Fig. 3). 유량은 펌프로 저수조에서 고수조로 이동한다. 와류 발생부의 곡선형측벽이 원주방향으로 갈수록 직경이 감 소하는 형태로 제작되어 유입된 유량은 소용돌이를 발생시키 며 유출구로 낙하한다. 유출구 크기에 따라 와류 발생부의 수 심과 유속이 변화한다.

와류 발전장치는 유수가 유입되는 유입구, 소형돌이 형상이 발생하도록 구비된 외부 와류 발생부와 내부 와류 발생부, 동 력을 발생시키는 임펠러부, 동력전달장치, 유수가 낙하하여 와 류의 세기를 증가시키는 유출구로 구성된다. 와류 발생부 저면 의 중앙에 조리개를 설치하였으며, 유출구 직경을 조절할 수 있어 자유롭게 직경비 변화에 따른 출력을 측정하도록 하였다. 와류를 발생시키는 와류 발생부는 PC(polycarbonate)로 제작 되었으며, 와류발생부 입구의 폭은 106.73 mm, 유출구 지름 (D_o)은 110 mm, 회전체 높이(H)는 300 mm, 두께는 5 mm, 외부직경(D_a)은 580 mm, 내부직경(D_i)은 470 mm이다. 와류 가 중력의 영향으로 낙하하도록 설계된 하부 유출구 높이는 575 mm이다(Fig. 4).

하드아노다이징 알루미늄 발전기와 동력전달장치는 와류 발 생부 상부에 설치되었다(Fig. 5). 동력을 전달하는 장치는 구동 풀리, 벨트, 회전중심축(샤프트) 등 와류 회전력을 발전기까지 전달하는 것으로 이루어졌다. 회전중심축은 동력전달 수단인 구동 풀리와 벨트로 발전기의 회전축과 연결되었다. 회전축 벨 트는 발전기 회전축에 회전력을 전달하도록 이루어졌다. 즉 유 량이 와류 발생부의 내부로 흐르면, 곡률형태로 이루어진 와류 발생부에서 소요돌이가 발생한다. 와류 발생부의 곡률로 가속 화된 와류는 블레이드를 돌려 회전중심축을 회전시킨다. 회 전중심축의 회전 운동에 의하여 구동 풀리와 벨트로 연결된



Fig. 3. Experimental setup of vortex turbine with the permanent magnet generator.



Fig. 4. Schematic diagram of the vortex chamber and the outlet.

발전기의 회전축에 회전력이 전달되어 전압과 전류를 발생시 킨다. 이때 발전기에서 발생하는 교류(AC)는 3상 브리지다이 오드(MDS50-16)를 이용하여 직류(DC)로 변환하였다. 전압 과 전류측정은 디지털 멀티미터(디지털 후크메타 3280-10과 체크맨 TK-203)를 사용하였다.

적절한 회전력, 전압 및 전류를 얻기 위해서는 풀리 크기를

조절해야 한다. 본 논문에 사용된 풀리(pulley) 직경은 각각 40.43 mm(기어 잇수 25개), 88.94 mm(기어 잇수 55개), 97.02 mm(기어 잇수 60개), 194.04 mm(기어 잇수 120개)이 다. 발전기(하드아노다이징 알루미늄 발전기) 회전축에는 40.43 mm와 97.02 mm 피동 풀리를 연결하였고 회전중심축 에는 88.94 mm와 194.04 mm 구동 풀리를 부착하였다. 동일 한 두께(B = 15 mm)의 풀리를 사용하였다(Fig. 6).

Choi et al. (2020)는 임펠러부와 커플링 되어 동력을 발생 시키는 수차의 러너 두 개(직선형 블레이드, 비틀린 블레이드) 를 제작하였다(Fig. 7). 본 연구는 풀리 크기변화에 따른 와류 발전장치의 효능을 측정하기 위해 3가지 블레이드(직선형 블 레이드(straight blade, SB), 비틀린 블레이드(twisted blade, TB), 소형 비틀린 블레이드(small twisted blade, STB)) 형태를 채택하였다(Fig. 7). 언급한 내부 곡선 모서 리가 있는 직선형 블레이드와 비틀린 블레이드 직경과 높 이는 각각 200 mm와 150 mm로 제작하였다. 본 연구에서 제작한 소형 비틀린 블레이드의 직경과 높이는 각각 110 mm 와 150 mm이다.



Fig. 5. 3D schematic drawing of a permanent magnet alternator with pulley.



Fig. 6. 3D schematic drawing of four different Pulleys: (a) D = 40.43 mm, (b) D = 88.94 mm, (c) D = 97.02 mm, (d) D = 194.04 mm.



Fig. 7. 3D schematic drawing of three different runners with (a) straight blade (SB), (b) twisted blade (TB) and (c) small twisted blade (STB).

3. 실험결과

3.1 풀리비와 블레이드에 따른 회전수

Fig. 8은 직경비(D_o/D_a) 0.189에서 3가지 블레이드 형태에 대한 회전수와 풀리비 관계곡선을 도시했다. 풀리비는 피동 풀 리 지름을 구동 풀리 지름으로 나눔으로써 계산하였다. SB와 TB일 경우 블레이드 형태와 상관없이 풀리비가 증가할수록 회전력은 감소하며, 최대 회전수는 풀리비 0.21에서 나타났다. STB에서 회전수는 풀리비 0.5 지점까지 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. 즉 최대 회전력은 회전중심축의 풀리 기어 잇 수 120개일 경우 영구자석발전기의 풀리 기어 잇수 25개보다 60개에서 높게 나타난다. 이때 STB에서 풀리비 변화와 상관없 이 와류높이는 일정한 반면 SB와 TB에서 풀리비가 증가함에 따라 와류 높이는 증가하는 경향을 보였다. 이를 통해 회전수 는 풀리비에 영향을 받는 것으로 분석되었다. 회전수 및 와류 높이 변화를 Table 2에 정리하여 제시했다.

Table 1은 기어변화에 따른 발전기의 피동 풀리 지름과 회 전중심축의 구동 풀리 지름을 나타낸다. 발전기 회전축에 기어 잇수 25개와 60개인 풀리를 연결하였고 회전중심축에 기어 잇 수 55개와 120개인 풀리를 부착하였다. 풀리비는 0.21, 0.45, 0.5, 1.09이다. 앞서 언급한 바와 같이 발전기 회전축에 연결

Units	Gene	rator	Tur	Dullar ratio	
	Pulley diameter (mm)	Number of teeth	Pulley diameter (mm)	Number of teeth	Tuney Tatio
Type 1(T1)	40.43	25	194.04	120	0.21
Type 2(T2)	40.43	25	88.94	55	0.45
Туре 3(Т3)	97.02	60	194.04	120	0.50
Type 4(T4)	97.02	60	88.94	55	1.09

Table 1. Specification of pulley diameter

Table 2. Parameters for straight blade (SB), twisted blade (TB) and small twisted blade (STB) (N(rpm) : rotation speed, hv : vortex height)

Pulley ratio	N(rpm)	h _v (cm)	Diameter ratios(D _o /D _a)	Blade profile	
0.21	401	16	0.189	CD	
0.45	274	22	0.189		
0.50	247	21	0.189	5D	
1.09	106	23	0.189		
0.21	388	15	0.189		
0.45	278	20.5	0.189		
0.50	268	21.5	0.189		
1.09	128	23	0.189		
0.21	306	19.5	0.189		
0.45	357	19.5	0.189		
0.50 435		20	0.189	316	
1.09 184		20.1	0.189	1	



Fig. 8. (a) Rotation speed and (b) vortex height of three different runners with increasing pulley ratio

된 피동 풀리 잇수를 회전중심축의 구동 풀리 잇수로 나눔으 로써 풀리비를 구했다.

3.2 전압과 전류변화

Fig. 9는 직경비(D_o/D_a) 0.189에서 3가지 블레이드 형태에 대한 풀리비가 변화할 때 측정한 전압을 나타낸다. SB와 TB에 서 블레이드 형태와 상관없이 풀리비가 증가할수록 전압은 감 소한다. SB와 TB에서 전압의 범위는 25 ~ 86 V 이다. STB에 서 최대 전압은 95.3 V로 측정되었으며, 전압은 40 ~ 96 V



Fig. 9. Voltage of three different runners with increasing pulley ratio.



Fig. 10. Current of three different runners with increasing pulley ratio.

범위이다. 직선 블레이드(SB)와 비틀린 블레이드(TB)의 최대 전압은 풀리비 0.21 지점에서 발생한 반면 STB의 최대 전압은 풀리비 0.5 지점에서 측정되었다. STB에서 평균 전압은 SB와 TB보다 높게 나타난다. 그 이유는 STB의 크기가 SB와 TB보 다 작아 와류흐름에 완전히 잠기므로 그 힘을 최대한 받기 때 문인 것으로 판단된다.

실험 측정에서 SB와 TB의 전류는 풀리비 0.21 지점에서 0.6 A 이상 나타난 반면 STB에서 전류는 풀리비 0.45 ~ 0.5 범위에서 0.6 A 이상 나타나는 경향을 보였다. Fig. 10은 전류와 풀리비의 관계 곡선을 도시했다. 풀리비가 증가할 때 SB와 TB에서 전류는 감소하였다. STB에서 전류는 풀리비 0.5까지 증가하다가 감소 하는 현상을 보였다. 구동 풀리가 작고 피동 풀리가 크면 전류는 현저히 감소하였다. 특히 STB에서 전류는 풀리비 0.5 지점보다 크면 감소하였다. 이러한 원리를 이용하여 최적화된 전류와 전압 을 얻기 위해 풀리비 조절이 필요하며 그 결과 전류와 회전중심 축의 구동 힘을 조절할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 발전량과 효율

발전기 출력(*P*_{out})은 와류부 유출구 지름이 일정할 때 블레이 드의 형태와 풀리비 변화에 따라 측정하였다. 발전기에서 발생 된 전압과 전류는 부하장치를 연결하여 디지털 멀티미터(디지 털 후크메타 3280-10과 체크맨 TK-203)로 측정하였다. 이론 출력(*P*_{tt})은 유량과 유효 낙차(H_e)을 고려하여 산정하였다. 유 효 낙차는 풀리비 변화에 따라 개수로 내 평균 유속(v₁), 와류 터빈의 하류부에서 유속(v₂)과 수심을 측정하여 결정하였다. 효율(η)은 식 (4)로 계산하였다. 아울러 Table 3은 이론 출력 과 발전기 출력을 비교한 것이다. 이를 통해 풀리비가 발전기 출력에 어떤 영향을 주는지 살펴볼 수 있도록 하였다.

발전기 출력은 풀리비에 따라 급격히 변화하였다(Fig. 11). 이론 출력은 풀리비와 상관없이 일정한 반면 와류수차의 출력 은 풀리비 0.5보다 크면 감소한다는 사실을 알 수 있다. 즉 최 대 출력이 블레이드 형태와 상관없이 풀리비 0.5 지점 내에서 발생하고 있다는 사실을 알 수 있다. 이때 전압은 25 ~ 62 V 범위이며, 전류 범위는 0.011 ~ 0.48 A이다. SB와 TB 조 건에서 최대 출력은 28.7 W 이상이고 STB에서 27.51 W이다. 실제 현장에 적용시 풀리비는 0.2 ~ 0.5 범위에서 결정하는 것이 타당하다고 사료된다.

Pulley ratio	Voltage (V)	Current (A)	P _{out} (W)	v ₁ (cm/s)	v ₂ (cm/s)	Q (m ³ /s)	H _e (m)	P _{in} (W)	η (%)	Blade profile
0.45	61.2	0.47	28.76	19.4	60.0	0.00769	0.73	55.01	52	SB
0.50	54.3	0.42	22.81	18.1	58.6	0.00694	0.73	49.65	46	
1.09	25.0	0.006	0.150	17.6	57.2	0.00662	0.74	48.01	0.3	
0.45	61.4	0.47	28.86	19.1	61.0	0.00702	0.73	50.22	57	ТВ
0.50	58.0	0.45	26.10	18.1	60.0	0.00695	0.72	49.04	53	
1.09	28.2	0.007	0.197	17.7	57.8	0.00708	0.75	52.04	0.4	
0.21	59.8	0.46	27.51	20.7	59.0	0.00728	0.71	50.65	54	STB
1.09	40.0	0.012	0.480	19.7	56.0	0.00695	0.71	48.36	1.0	

Table 3. Power and efficiency of three different runners with increasing pulley ratio







Fig. 12. Efficiency of three different runners with increasing pulley ratio.

Fig. 12는 3가지 블레이드에 따른 풀리비와 효율을 나타낸 다. 유효 낙차를 고려한 이론 출력(P_u)이 풀리비를 고려한 출 력(P_{ou})보다 상대적으로 높게 나타난다. 효율은 풀리비에 따라 0.2 ~ 58 % 범위이다. 유효 낙차를 고려한 이론 출력 범위는 48 ~ 56 W인 반면 수차의 출력은 0.15 ~ 29 W 범위이다. SB, TB와 STB의 최대 효율은 풀리비 0.5 지점 이내에서 발생 한다는 사실을 분석하였다. 풀리비에 따라 효율의 차이가 크다 는 사실을 증명할 수 있었다. 최대효율을 결정하기 위해 최적 화된 풀리비에 관한 연구가 앞으로 필요하다.

4.결 론

본 논문은 자유수면의 와류수차 성능에 대해 실험에 기반하 여 실시한 연구결과를 도출하였다. 제작된 4개 풀리비가 유속, 수위, 와류 높이, 유효낙차 등에 따른 수차의 회전수, 전류 및 전압에 어떤 영향을 미치는지에 중점을 두고 연구가 진행되었 다. 여기서 하드아노다이징 알루미늄 발전기를 사용하여 전류 와 전압을 발생시켰으며, 출력과 효율을 분석하였다. 측정한 자료를 바탕으로 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 유출구 직경과 유입유량이 일정할 때 SB와 TB 조건에서

블레이드 형태와 상관없이 풀리비가 증가할수록 회전력은 감 소하였다. 최대 회전수는 풀리비 0.21에서 발생했다. STB에서 회전수는 풀리비 0.5 지점까지 증가하다가 감소하는 경향을 보였다. SBT에서 풀리비 변화와 상관없이 와류높이는 일정한 반면 SB와 TB에서 풀리비가 증가함에 따라 와류 높이는 증가 하였다. 최대 회전력은 SB와 TB 조건에서 회전중심축의 풀리 기어 잇수 120개와 발전기의 풀리 기어 잇수 25개에서 나타난 반면 최대회전수는 STB 조건에서 회전중심축의 풀리 기어 잇 수 120개와 발전기의 풀리 기어 잇수 60개에서 나타난다. 풀 리비에 따른 회전수는 블레이드 크기에 영향을 받는다는 사실 을 확인하였다.

2) SB와 TB에서 전압 범위는 25 ~ 86 V이며, STB에서 전 압은 40 ~ 96 V 범위이다. 직선 블레이드(SB)와 비틀린 블레 이드(TB)의 최대 전압은 풀리비 0.21 지점에서 발생한 반면 STB의 최대 전압은 풀리비 0.5 지점에서 측정하였다. SB와 TB 조건에서 전류는 풀리비 0.45 지점에서 0.47 A인 반면 STB에서 전류는 풀리비 0.21에서 0.46 A를 측정하였다. 블레 이드 형상에 관계없이 최대 전압과 전류는 풀리비 0.5 이하에 서 발생하였다.

3) 유효 낙차를 고려한 이론 출력은 48 ~ 56 W인 반면 출 력의 범위는 0.15 ~ 29 W 이다. 이론 출력은 풀리비와 상관 없이 일정하지만 출력은 풀리비 0.5보다 크면 급격히 감소한 다는 사실을 나타냈다. 즉 최대 출력이 블레이드 형태와 상관 없이 풀리 비 0.5 지점 내에서 발생하고 있다는 사실을 파악했 다. 와류수차를 적용한다면 풀리비는 0.2 ~ 0.5 범위에서 결 정하는 것이 타당할 것이라고 판단된다.

4) 와류수차의 효율은 풀리비에 따라 0.2 ~ 58 % 범위이 다. SB, TB와 STB의 최대 효율은 풀리비 0.5 지점 이내에서 발생한다는 사실을 확인하였다. 또한 풀리비에 따라 효율의 차 이가 크다는 사실을 증명할 수 있었다. 최대효율을 결정하기 위해 최적화된 풀리비에 관한 연구는 앞으로 필요하다.

본 논문에서 제시한 풀리비에 따른 실험결과는 아주 기초적 인 자료이므로 정격출력조건에서 와류수차 성능에 영향을 미 치는 물리적 인자(블레이드 위치변화, 블레이드 형상, 유량변 화, 유효낙차, 와류 발생부 형태, 유입구, 유출구 변화, 풀리비 등)에 대한 지속적인 실험과 함께 최적화된 설계를 위해 와류 발생부내 유동해석이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2021년 서일대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구함.

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 Vol. 22. No. 2. pp. 121–129. https://doi.org/10.17663/JWR.2020.22.2. 121
- Gheorghe–Marius, M and Tudor, S (2013). Energy capture in the gravitational vortex water flow. J. of Marine Technology & Environment vol 1. <u>http://worldcat.</u> org/issn/18446116
- Mulligan, S, Casserly, J and Sherlock, R (2016). Experimental and numerical modelling of free-surface turbulent flows in full air-core water vortices. In Advances in Hydroinformatics; *Springer*: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 549–569.
- Müller, S, Cleynen, O, Hoerner, S, Lichtenberg, N and Thévenin, D (2018). Numerical analysis of the compromise between power output and fish–friendliness in a vortex power plant. *J. Ecohydraulics*, 3, 86–98. <u>https://doi.org/10.1080/</u> 24705357.2018.1521709
- Nicolet, C, Zobeiri, A, Maruzewski, P and Avellan, F (2011). Experimental investigations on upper part load vortex rope pressure fluctuations in francis turbine draft tube. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 4, no. 1, pp. 179–190. <u>https://doi.org/10.5293/IJFMS.</u> 2011.4.1.179
- 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. <u>https://doi. org/10.1155/2017/2610508</u>
- 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)

- Powalla, D, Hoerner, S, Cleynen, O, Müller, N, Stamm, J and Thévenin, D (2021). A Computational Fluid Dynamics Model for a Water Vortex Power Plant as Platform for Etho- and Ecohydraulic Research. *Energies*, 14, 639. https://doi.org/10.3390/en14030639
- 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. <u>DOI:</u> 10.7763/JOCET.2016.V4.263
- 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. <u>https://doi.org/10.11113/jt.v74.4645</u>
- Vu, T, Koller, M, Gauthier, M and Deschenes, C (2011). Flow simulation and efficiency hill chart prediction for a Propeller turbine. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 4, no. 2, pp. 243–254. <u>DOI:</u> 10.1088/1755–1315/12/1/012040
- 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. <u>DOI: 10.1166/asl.2012.3855</u>
- Wagner, F, Warth, P, Royan, M, Lindig, A, Müller, N and Stamm, J (2019). Laboruntersuchungen zum Fischabstieg über ein Wasserwirbelkraftwerk. Wasserwirtschaft, 109, 64–67
- 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
- Zotloeterer, F (2004). Hydroelectric power plant. Patent WO 2004/061295A3,2004