

# 사이펀 기반 시스템을 활용한 블레이드 수 변화에 따른 마이크로 소수력 발전에 관한 실험적 연구

김종우\*<sup>†</sup> · 최인호\* · 정기수\*\*

\*서울대학교 건설시스템공학과

\*\*한국생산기술연구원

## An Experimental Study on Micro-Hydropower Generation Using a Siphon-Based System with Varying Blade Numbers

Jong-Woo Kim\*<sup>†</sup> · In-Ho Choi\* · Gi-Soo Chung\*\*

<sup>†</sup>Department of Civil Engineering, Seoul University, Seoul, Korea

<sup>\*\*</sup>Korea Institute of Industrial Technology(KITECH)

(Received : 09 July 2025, Revised : 27 July 2025, Accepted : 27 July 2025)

### 요약

본 연구는 마이크로 사이펀 수차의 성능에 블레이드 수가 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 블레이드 수는 2개에서 6개까지 변화시켰으며, 수로의 유입 유속, 상부 수조의 수심, 회전 속도, 토크, 전류, 전압 등의 주요 성능 지표를 동일한 조건에서 측정하였다. 그 결과, 블레이드 수가 2개에서 5개로 증가함에 따라 상부 수조의 수심은 상승하고 유입 유속은 감소하는 경향을 보였다. 이 범위 내에서 전압, 회전 속도, 토크, 전류는 전반적으로 증가하는 추세를 나타냈다. 그러나 블레이드 수가 5개를 초과할 경우 성능 향상이 둔화했으며, 블레이드 수가 5개일 때 수차의 전기 출력이 최적화되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 수심, 마이크로 사이펀 수차, 블레이드 수, 전기적 출력

### Abstract

This study experimentally investigates the effect of the number of blades on the performance of a micro siphon turbine. The number of blades was varied from two to six, and key performance indicators such as inlet flow velocity at the channel, water depth in the upper tank, rotational speed, torque, current, and voltage were measured under the same conditions. The results show that as the number of blades increased from two to five, the water depth in the upper tank rose, while the inlet flow velocity decreased. During this range, voltage, rotational speed, torque, and current generally exhibited increasing trends. However, beyond five blades, performance gains diminished, indicating that the turbine's electrical output was optimized when equipped with five blades.

Key words : Water depth, Micro siphon turbine, Blade number, Electrical output

## 1. 서론

지구 대기 중 이산화탄소를 포함한 온실가스의 배출은 지구온난화와 기후변화를 초래하며, 이는 생태계 파괴, 해수면 상승, 기상이변 등 다양한 환경 문제로 이어지고 있다. 이러한 환경적 위기에 대응하려는 방안으로, 우리나라는 탄소중립 실현, 에너지 안보 확보, 그리고 신재생에너지 확대를 핵심으로

하는 에너지 정책을 적극 추진하고 있다. 정부는 2050년까지 탄소 순 배출 제로(net-zero)를 목표로 '탄소중립 녹색성장 기본계획'을 수립하였으며, 배출권 거래제(ETS)의 강화와 신재생에너지공급의무화제도(RPS)의 도입을 통해 기업과 산업의 탄소 감축을 유도하고 있다. 2030년까지 전체 발전량 중 재생에너지 비중을 20% 이상 확대하는 것을 목표로 함에 따라, 신재생에너지 개발의 중요성은 더욱 커지고 있다. 현재

<sup>†</sup>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)/gchung@kitech.re.kr



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

널리 활용되고 있는 주요 신재생에너지원에는 태양열, 풍력, 수력, 조력, 지열 등이 있으며, 이 중에서도 수력 발전은 16%의 비중을 차지하며 가장 높은 사용률을 보인다(Dechamps, 2023). 수력 발전은 100년 이상의 기술 축적을 바탕으로 안정성과 효율성을 확보해 왔으며, 예측 가능성과 가용성이 뛰어난 에너지원으로서 재생에너지 분야에서 중추적인 역할을 하고 있다(Breyer, 2020).

특히 사이편 원리를 활용한 마이크로 소수력 발전 시스템은 중력과 대기압 차이에 의해 유동을 유도하여 전력을 생산한다. 이 방식은 기존 수로 구조물을 크게 변경하지 않고 설치할 수 있어 생태계 교란을 최소화하며, 경제성과 친환경성을 동시에 갖춘다. 구조가 단순하고 설치가 용이하여 저수두 환경에 적합하며, 기술 인력이 부족한 지역에서도 안정적인 운영이 가능하다. 또한 농업용 수로, 관개 시설, 소형 댐 등 기존 인프라를 활용할 수 있어 지역 참여 및 일자리 창출에도 기여할 수 있다.

사이편 수차 기술에 대한 연구는 Eller가 그 원리를 설명한 것을 시작으로 본격화 되었으며( Eller, 1982), 이후 다양한 연구가 이어졌다. Stark et al. (2011)은 소규모 사이편 수차 시스템을 대상으로 수치 모델링 및 실험을 수행하여, 해당 기술이 저낙차 수력 발전에 적용 가능함을 입증하였다. Loots et al. (2015)와 Alidai and Pothof (2015)은 저낙차 조건에서의 시스템 설계 최적화와 에너지 효율성을 평가하였으며, 특히 사이편 구조의 유압 손실과 설치 용이성에 주목하였다. Zhou et al. (2019)은 전산 유체 역학(CFD) 분석을 통해 수두, 유속, 압력 분포 등의 물리적 인자가 사이편 수차의 성능에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였고, 이를 통해 수차 설계의 정밀도를 높이는 기초 데이터를 제공하였다. Krylov et al. (2021)은 다양한 유량 조건에서 실험을 수행하여 사이편 수차 시스템의 효율 변화를 분석하였고, 유량 변화에 따른 동적 응답 특성을 규명하였다. 최근 Guerraa et al. (2024)은 블레이드 수와 수차의 허브 직경 대비 외경의 비율( $d/D$ )이 발전 효율에 미치는 영향을 연구하였으며, 전산 유체 역학(CFD) 분석에서 블레이드 수 5개,  $d/D$  비율 0.35일 때 최대 발전 효율 41.4%를 기록하였다. 이는 소형 사이편 수차 시스템 설계 시 고려해야 할 핵심 매개 변수를 제시한 결과로 평가된다. 이외에도 다양한 연구들이 사이편 수차 기술의 적용 가능성과 성능 향상을 위한 요소들을 규명해왔다. Mardiana-Euers (2013)은 사이편 수차의 구조적 안정성과 공기 혼입 문제를 분석하였다. Sari et al. (2018)은 입자 기반 시뮬레이션을 통해 유동장 내 난류 특성과 블레이드의 상호작용을 분석하였고, 이를 통해 저효율 구간에서 발생하는 에너지 손실의 주요 원인을 밝혀냈다. 또한 Martinez et al. (2019)은 사이편 수차의 성능 특성과 어류나 생태계에 주는 영향을 정량적으로 분석하였으며, 어류 통과 시 심각한 스트레스나 부상 가능성이 낮아 생태 친화적인 발전 기술로 평가하였다. 사이편 수차는 구조적 단순성, 경제성, 친환경성 등의 이점을 바탕으로 학문적 관심과 기술적 발전의 중심에 서 있다. 특히 중소규모 수력발전 분야에서의 활용이 확대되면서, 성능 향상을 위한 구조적

최적화의 필요성이 제기되고 있다. 사이편 수차의 성능은 여러 설계 인자에 의해 영향을 받으며, 그중 블레이드 수는 출력 전력, 회전수, 효율 등 주요 성능 지표에 직접적인 영향을 미치는 핵심 요소 중 하나로 지목된다. 국내의 경우, 와류 수차 성능에 대한 블레이드 수의 영향을 Kim et al. (2023)이 실험적으로 조사하였다. 그런데도 불구하고, 사이편 기반에서 블레이드 수 변화에 따른 성능 변화에 관한 체계적이고 정량적인 실험연구는 아직 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 블레이드 수의 변화가 사이편 수차의 성능에 미치는 영향을 분석하고자 실험하였다. 프로펠러 형식인 사이편 수차를 사용하였으며, 모든 실험은 동일한 조건에서 실시했다. 허브와 외경 간의 일정한 비율을 기준으로 블레이드를 2엽에서 6엽까지 단계적으로 변화시켜, 유입 유속, 수조 수심, 회전수, 전압, 전류, 토크 등의 주요 성능 변수를 정량적으로 측정하였다. 이를 통해 향후 사이편 수차 설계의 최적화를 위한 기초 데이터를 제공하고자 한다.

## 2. 연구방법

### 2.1 기본방정식

사이편 수차의 성능은 관 지름( $D$ ), 사이편의 길이( $L$ ), 블레이드의 형상과 수, 유량( $Q$ ), 유효 낙차( $H$ ) 등 여러 변수에 의해 결정된다. 일반적으로 이론 수력은 유효낙차를 고려할 때 식(1)과 같이 표현한다.

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

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

사이편 유동에서 출구 유속이 즉시 정체 상태에 도달할 경우, Bernoulli 정리를 적용하여 유효낙차( $H$ )는 식 (2)와 같이 표현한다(Fig. 1).

$$H = \left( f \frac{L}{D} + \sum K \right) \frac{V}{2g} \quad (2)$$

여기서,  $f$ 는 마찰손실계수,  $L$ 은 관의 총길이,  $D$ 는 관 직경,  $K$ 는 입구손실계수( $K_{in}$ ), 출구손실계수( $K_{out}$ ) 및 굴곡손실계수( $K_b$ ) 등을 포함한다. 난류 유동 조건에서는 마찰손실계수( $f$ )를 약 0.013로 적용하는 것이 경험적으로 타당하며, 실무 설계에서도 적절한 근삿값으로 널리 사용된다(White, 2011; Mott and Untener, 2015; Idelchik, 2006; Crane, 2018). 유체가 관로에 진입하거나 이탈할 때 발생하는 국부 손실 중, 입구 손실계수( $K_{in}$ )는 1.0이며, 출구손실계수( $K_{out}$ )는 0.5로 간주한다(Idelchik, 2006). 또한 관로 내 굴곡에 의한 손실계수( $K_b$ )는 굴곡의 각도 및 곡률 반경에 따라 다르며, 일반적으로 0.2 - 0.5 범위를 가진다(Mott and Untener, 2015; Miller, 1990). 정밀 가공된 커플러나 소켓이 사용되며, 이에 따른 손실계수는 약 0.02 - 0.05로 보고된다(Idelchik, 2006; Crane, 2018).

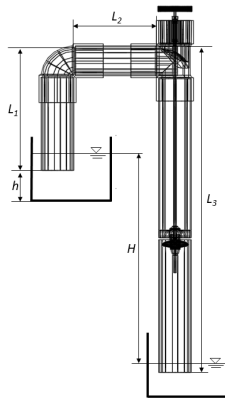


Fig. 1. Schematic diagram of a siphon turbine.

Table. 1 Design specifications of the prototype micro siphon turbine

Description	Symbol	Dimensions
Total length of the siphon pipeline	L	1.98 m
Diameter of the siphon pipe	D	0.10 m
Total head	H	0.89–0.91 m
Elevation above the bottom of the upper tank	h	0.097 m

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

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

유체 흐름에 따라 회전축의 토크( $T$ )는 발전기 출력과의 식 (4)와 같이 나타낸다.

$$T = \frac{P_{out}}{\omega \cdot \eta_g} \quad (4)$$

여기서,  $P_{out}$ 는 출력(W),  $T$ 는 토크(N·m),  $\omega$ 는 회전 각속도(rad/s),  $\eta_g$ 는 발전기 효율이다. Holland (1983)은 발전기 효율( $\eta_g$ )을 0.75 – 0.90 범위로 추정할 수 있음을 언급하였다.

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

$$\omega = \frac{2\pi N}{60} \quad (5)$$

여기서,  $N$ 은 회전수(rpm)이다. Carrelhas et al. (2023)은 수차의 전기 출력과 회전수를 통해 토크를 산출하는 방법을 제시하였다.

## 2.2 실험 장치와 방법

본 연구에서는 다양한 블레이드 수를 적용할 수 있도록 수차 부를 모듈화한 축소형 사이펀 수차 모델을 제작하였으며, 각 블레이드 수에 따라 교체할 수 있도록 설계하였다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 사이펀 수차(siphon turbine)는 출구부에

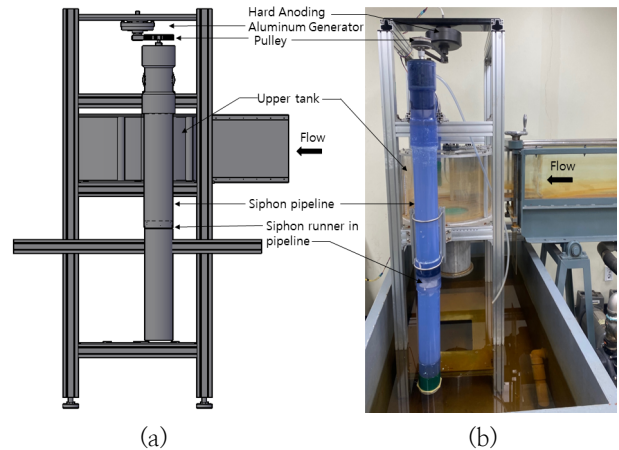


Fig. 2. (a) Schematic design of the hydropower plant and (b) experimental setup of the siphon turbine.

설치되어 낙차(H)를 기반으로 한 사이펀 작용을 통해 유체를 유도하고, 이로부터 발생한 유동 에너지를 전기 에너지로 변환하는 방식으로 구성된다. 실험 장치는 개수로와 연결된 유입부, 상부 수조, 사이펀 관로 본체, 교체형 블레이드, 발전기, 회전수 측정계, 전압 및 전류 측정 장치 등으로 구성되며, 사이펀 관로는 내부 유동 관찰을 위해 투명 PVC로 제작되었다. 상부수조 우측에 연결된 개수로는 폭 160 mm, 높이 300 mm, 길이 1500 mm이다. 유량은 개수로를 통해 상부 수조에 유입되며 사이펀 관로를 통해 하부 수조로 이동된다. 사이펀 흐름은 자연 유도 방식으로 외부 에너지원 없이도 수차를 구동할 수 있다. 사이펀 관로 내 수차는 유동으로 회전하며, 블레이드에 작용하는 운동량 변화가 토크를 발생시켜 축을 중심으로 회전 운동을 유도한다. 이 회전은 축과 연결된 소형 발전기를 구동시켜 전기 에너지로 변환된다. 설치된 발전기는 선앤윈드 에너지사의 300 W 하드아노다이징 알루미늄 3상 발전기이다. 발생된 교류(AC)는 브리지다이오드(MDS50-16)를 통해 직류(DC)로 정류하였다. 전압과 전류는 디지털 후크메타(3280-10)와 클램프 미터를 사용하여 측정하였으며, 부하는 10 W LED 램프(220 V)를 직렬로 구성하였다.

실험은 일정한 유효 낙차(H) 및 유량 조건에서 수행되었으며, 블레이드는 동일한 형상을 유지한 채 2엽, 3엽, 4엽, 5엽, 6엽으로 변화시켜 실험에 적용하였다(Fig. 3). 상부 수조의 수심은 14.4 cm이다. 유입 유량은 블레이드 수에 따라 변화하였으며, 그 범위는 7.2 – 11 L/s이다. 블레이드 수는 유체의 작용 면적 및 회전 저항과 밀접한 관계가 있다. 블레이드 수가 증가하면 부하 분산은 쉬우나 유체 저항 및 손실도 증가할 수 있으며, 반대로 블레이드 수가 적으면 유동 불균일성으로 인해 효율이 저하될 수 있으므로 본 연구에서 살펴보고자 한다. 각 블레이드 수에 대해 발전된 전압 및 전류를 측정하였다. 유량은 유량 밸브를 통해 모니터링 하였다. 모든 실험은 동일 조건에서 반복 수행하여 신뢰성을 확보하였으며, 각 실험 데이터는 평균값으로 정리하였다.

본 연구에서 사용된 사이펀 수차는 프로펠러 형식이며, 허브(hub)는 블레이드를 지지하는 중심축의 역할을 한다.

외경(D)은 블레이드 끝단의 반경이며, 허브 직경(d)은 중심 부의 직경으로 정의된다. 사이펀 수차의 외경(D)은 95 mm, 허브직경(d)은 25 mm이며, 직경비(d/D)는 0.26이다. d/D 비율은 유효 유동 면적 및 유동 속도 분포에 영향을 미치며, 이에 따라 효율도 변할 수 있다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 회전수 변화

Fig. 4는 블레이드 수에 따른 수차의 회전수를 보여준다. 블레이드 수가 2개에서 5개로 증가함에 따라 회전수는 뚜렷한 증가 폭을 보였다. 이 구간에서는 블레이드 수의 증가로 인해 물의 흐름을 받는 유효 면적이 확대되고, 물과의 접촉 빈도 또한 증가하여 더 많은 운동 에너지가 수차에 효과적으로 전달된 것으로 분석된다. 즉, 물의 에너지를 더욱 효율적으로 흡수함으로써 회전 성능이 향상된 것으로 판단된다. 그러나 블레이드 수가 5개 이상으로 증가하면서부터는 회전수 증가 폭이 점차 감소하는 경향을 나타냈다.

이는 블레이드 수의 과도한 증가로 인해 유체 유동에 대한 저항이 증가하고, 동시에 수차의 회전 관성 역시 커지면서 전체적인 회전 반응성이 저하된 데 기인하는 것으로 생각한다. 이러한 경향을 종합적으로 분석한 결과, 회전수가 최대치를 나타내는 임계 블레이드 수(optimal blade number)는 5개인 것으로 판단된다.

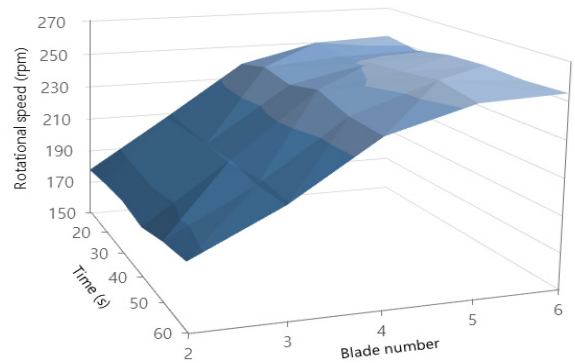


Fig. 4. Effect of blade number on rotational speed.

#### 3.2 최적의 블레이드 수에 따른 전압과 전류

Fig. 5의 실험 결과에서 알 수 있듯이 마이크로 사이펀 수차의 전압과 전류는 블레이드 수의 변화에 따라 뚜렷한 차이를 보였다. 블레이드 수가 2개에서 6개로 증가함에 따라 출력 전압과 전류 모두 전반적으로 증가하는 경향을 나타냈다. 특히 블레이드 수가 5개일 때까지는 전압 및 전류의 상승폭이 상대적으로 크게 나타났으며, 이에 따라 수차의 에너지 변환 효율이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 이러한 결과는 블레이드 수가 증가함에 따라 유체와 블레이드 간의 접촉 면적이 확대되고, 물의 운동 에너지가 보다 효율적으로 회전 운동으로 전달되었기 때문으로 해석된다. 그러나 블레이드 수가 5개를 초과한 이후부터는 전압 및 전류의 증가 폭이 다소

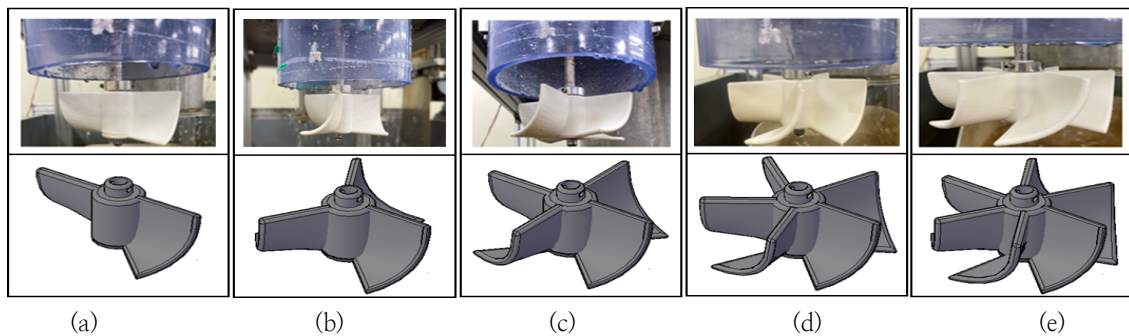


Fig. 3. 3D schematic drawings of siphon runners with varying blade configurations: (a) two blades, (b) three blades, (c) four blades, (d) five blades, and (e) six blades.

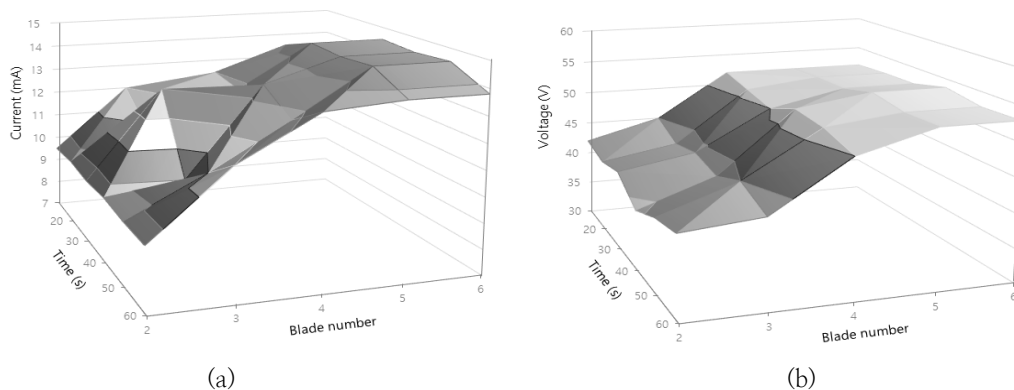


Fig. 5. Effect of blade number on (a) current and (b) voltage in a micro siphon turbine.

감소하는 경향이 관찰되었다. 이는 블레이드 수의 과도한 증가가 오히려 유체의 흐름을 방해하고, 사이펀 내부에서의 유동 저항 및 난류 발생을 유도함으로써 에너지 전달 효율을 저하한 결과로 판단된다.

또한 블레이드 수 증가에 따른 수차의 회전 관성 증가 역시 반응성을 저해하는 요인으로 작용했을 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 블레이드 수가 5개일 때 마이크로 사이펀 수차의 전기적 출력 성능이 최적화됨을 확인할 수 있었으며, 이는 향후 마이크로 수력 시스템의 설계 시 블레이드 수 결정에 있어 중요한 설계 기준으로 활용될 수 있을 것이다.

### 3.3 토크 변화

토크는 전기적 출력과 회전수( $\lambda$ )를 이용하여 계산하였으며, 발전기 효율( $\eta_g$ )은 일반적으로 활용되는 0.75 - 0.90 범위 중 0.75로 가정하였다. 블레이드 수 증가에 따른 토크 변화 및 증가율을 분석한 결과(Fig. 6), 초기 구간에서는 뚜렷한 토크 증가가 확인되었으나, 일정 블레이드 수 이상부터는 증가율이 급격히 감소하거나 오히려 토크가 감소하는 경향이 관찰되었다. 블레이드 수가 2개에서 3개로 증가할 때 평균 토크는 0.0266 N·m에서 0.0288 N·m으로 증가하며, 약 8.36 %의 증가율을 보였다. 이어서 3개에서 4개로 증가할 때 18.7 %, 4개에서 5개로는 9.62 %로 증가율이 점차 감소하는 패턴을 나타냈다.

반면, 블레이드 수가 5개에서 6개로 증가했을 때는 토크가 0.0374 N·m에서 0.0376 N·m으로 0.39 %의 증가율을 기록하였다(Table 2). 이러한 결과는 블레이드 수 증가가 수차 성능 향상에 긍정적인 영향을 미치지만, 그 효과가 일정 수준에서 한계가 보임을 시사한다. 초기에는 블레이드 수 증가로 인해 물과의 접촉 면적이 넓어지고, 동력 전달 효율이 향상되어

토크가 증가한다. 그러나 블레이드가 일정 수를 초과하면, 블레이드 간 간격이 좁아지면서 유체 흐름을 방해하고, 유동 저항 및 난류 발생이 증가하게 된다. 이에 따라 물의 운동 에너지가 효율적으로 전달되지 못하고, 오히려 에너지 손실이 발생함으로써 전체적인 회전력 저하로 이어진다. 또한 블레이드 수가 많아짐에 따라 수차의 관성 모멘트가 커져, 동일한 수력 조건에서도 회전 반응성이 저하되는 원인으로 작용할 수 있다.

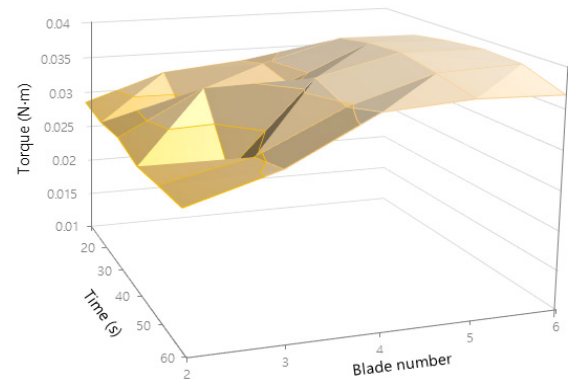


Fig. 6. Effect of blade number on torque output.

Table 2. Variation of rotation speed, current, voltage, and torque with different blade numbers

Blade number	Rotation speed (rpm)	Current (mA)	Voltage (V)	Torque (N·m)
2	181	9	42	0.0266
3	209	11	43	0.0288
4	242	13	50	0.0342
5	252	14	53	0.0374
6	251	14	53	0.0376

Table 3. Effect of increasing water depth in the upper tank on rotational speed, current, voltage, and torque

Water depth (cm)	Time (s)	Rotation speed (rpm)	Current (mA)	Voltage (V)	Torque (N·m)
14.4	10	250	13.0	52.0	0.0344
	20	248	14.0	52.3	0.0376
	30	251	14.5	52.4	0.0385
	40	253	14.4	53.7	0.0389
	50	256	14.5	52.8	0.0380
	60	252	13.8	53.0	0.0369
15.5	10	260	15.0	55.0	0.0404
	20	264	15.5	56.0	0.0418
	30	262	15.0	57.0	0.0415
	40	270	15.4	56.5	0.0410
	50	271	15.4	56.0	0.0405
	60	273	15.6	56.0	0.0407
16.0	10	288	19.0	61.3	0.0515
	20	293	18.7	61.9	0.0503
	30	289	18.9	62.2	0.0518
	40	290	19.1	62.0	0.0520
	50	292	18.8	62.4	0.0511
	60	295	19.0	62.1	0.0509



따라서 본 실험에서는 블레이드 수 5개에서 다른 블레이드 수(2개, 3개, 4개)보다 더 높은 토크 값을 기록했으며, 이는 토크 증가 측면에서의 사실상 임계점으로 해석된다. 이후의 블레이드 수 증가는 오히려 효율 저하로 이어질 수 있음을 감안할 때, 설계 시 블레이드 수의 최적화를 고려해야 할 필요성이 크다.

### 3.4 수리 조건에 따른 상호작용

본 실험에서는 블레이드 수를 5개로 고정한 상태에서 상부 수조의 수심을 변화시키며 사이펀 수차의 성능 특성을 분석하였다(Table 3). 실험 결과, 저유량 조건에서는 블레이드 수의 변화에 따른 성능 차이가 상대적으로 작게 나타났으나, 상부 수조의 수심 변화는 수차의 전압, 전류, 토크 및 회전수 등 주요 성능 지표에 유의미한 영향을 미치는 것으로 관찰되었다. 특히, 상부 수조 내 수심 증가에 따른 낙차 변화가 사이펀 내 압력 및 유량에 영향을 주어 회전력 생성에 직접적인 변화를 유도한 것으로 판단된다.

구체적으로, 상부 수조의 수심이 기준 대비 1.1 cm 이상 증가했을 때, 블레이드 5개 구성의 수차 조건에서 전압, 전류, 토크 및 회전수가 증가하였다(Fig. 7). 이는 상부 수조에서 형성되는 수리적 조건과 블레이드 수 사이에 존재하는 상호 작용 효과에 기인한 것으로 볼 수 있다. 수심 증가로 인해 공급 유량 및 유효 낙차가 증가하면서 블레이드에 작용하는 힘이 최적화되고, 이에 따라 회전 운동이 더욱 효율적으로 유도된 것으로 해석된다. 이러한 결과는 마이크로 사이펀 수차의 성능 향상을 위해 단순한 블레이드 수 증가뿐만 아니라, 상부 수조의 수심 및 유량 조건과의 연계된 최적 설계가 필수적임을 시사한다. 따라서 향후 사이펀 수차 설계 시에는 수리 조건과 블레이드 수를 동시에 고려한 복합적인 성능

분석이 필요할 것으로 판단된다.

동일한 조건에서 블레이드 수 변화에 따른 상부 수조의 수심과 개수로 유입 유속을 측정하였다(Fig. 8). Fig. 8에 따르면, 상부 수조의 수심은 블레이드 수가 증가함에 따라 상승하다가 일정 수 이상에서 감소하는 경향을 보였다. 한편, 개수로 유입 유속은 블레이드 수 3개까지 급격히 감소하였으며, 이후에는 거의 일정하게 유지되었다. 이러한 결과는 블레이드 수 변화가 유체 흐름 특성에 영향을 미침을 시사한다.

Fig. 9의 실험 결과와 같이, 사이펀 관로 내 공기(air) 유입은 수차의 출력 저하를 초래하였으며, 이때 출력은 0.3 - 0.8 W 범위로 감소하였다. 특히, 수차의 전기적 출력은 이론 출력에 비해 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 유입부에서의 공기 혼입이 내부 유동을 교란시켜 유효 낙차를 감소시키고 수두 손실을 증가시킨 결과로, 수차 효율 저하의 주요 원인 중 하나로 작용한다. 이러한 공기 혼입 현상은 수차의 출력 저하뿐 아니라, 유동 불안정, 공동현상(cavitation), 진동 등을 초래하여 장기적인 운전 신뢰성에도 악영향을 미칠 수 있다. 특히 저낙차

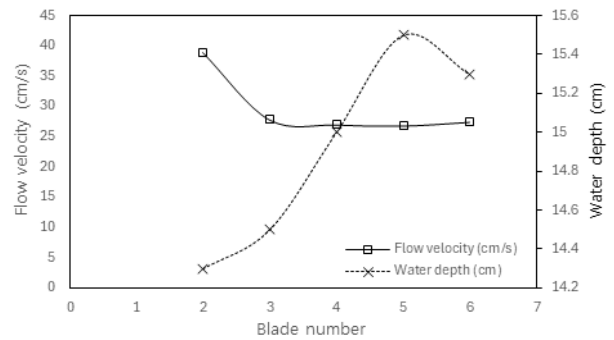


Fig. 8. Effect of blade number on inlet flow velocity and water depth in the upper tank.

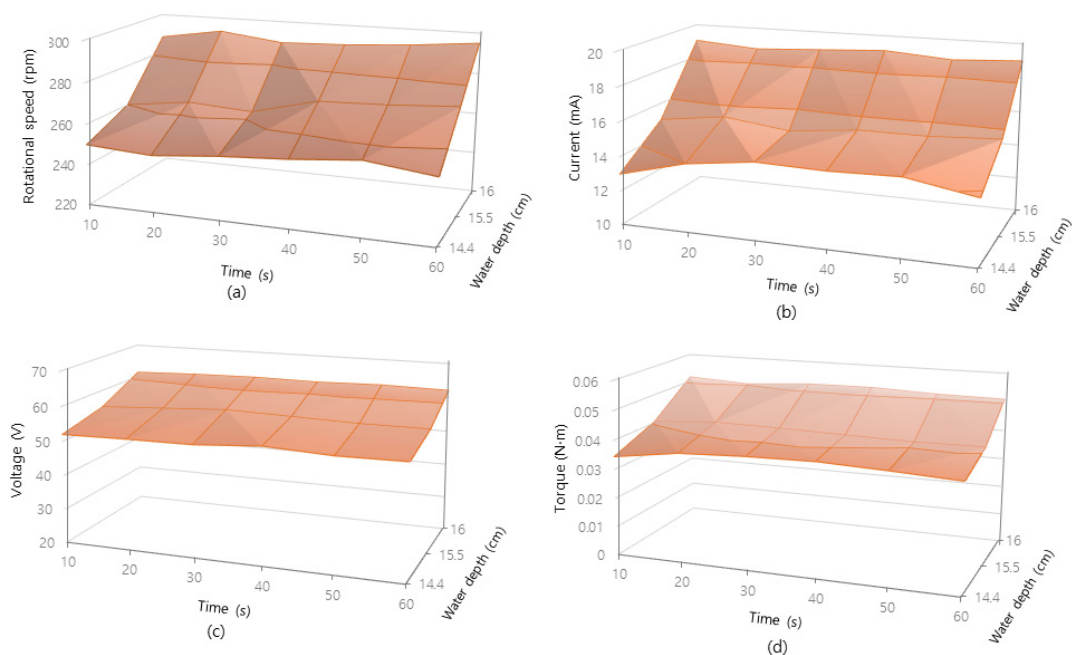


Fig. 7. Effect of water depth in upper tank on (a) rotational speed, (b) current, (c) voltage, and (d) torque of the siphon turbine.

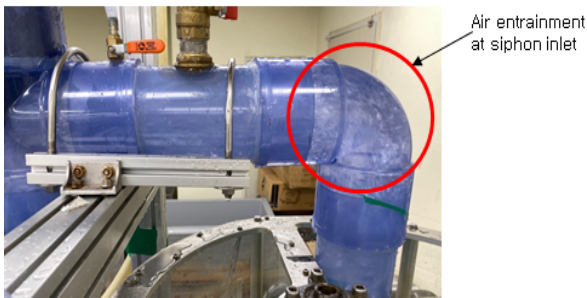


Fig. 9. Air entrainment from the inlet of the siphon turbine.

조건에서는 사이펀이 완전히 채워진 상태를 유지하는 것이 중요하므로, 미세한 공기 유입조차 시스템의 정상 작동을 방해할 수 있다. 공기주머니가 형성되면 내부 압력 분포에 변화를 일으켜 흐름의 가속을 방해하고, 때에 따라 자기 기동(self-priming) 능력을 상실하게 된다. 반복적인 공기 유입은 정상 상태 유동의 형성을 어렵게 만들고, 비정상적이거나 간헐적인 흐름을 유발할 수 있다. 따라서 사이펀 유입 및 관로 내에서 발생하는 공기 유입 메커니즘을 규명하고, 이로 인한 유동 특성 변화를 이해하는 것은 수차 설계 최적화 및 안정적 운전을 위한 핵심 요소라 할 수 있다. 이에 따라, 유입구 형상 개선, 접합부 밀폐성 향상, 공기 제거 장치 도입 등의 저감 방안이 고려되어야 한다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 블레이드 수의 변화가 사이펀 수차의 성능에 미치는 영향을 실험적으로 분석하였다. 블레이드를 2엽부터 6엽까지 단계적으로 변화시키며 각 조건에서 회전수(rpm), 토크(N·m), 전류(A), 전압(V) 등의 주요 성능 지표를 측정하였다. 실험 결과, 블레이드 수에 따른 성능 변화 경향을 다음과 같이 확인할 수 있었다.

- 1) 블레이드 수 증가에 따라 회전수가 상승하였으며, 이는 유효 접촉 면적 확대와 에너지 전달 증가에 기인한다. 그러나 5개 초과 시 유체 저항 및 관성 증가로 회전수 증가폭이 둔화했다.
- 2) 블레이드 수가 2개에서 5개까지 증가함에 따라 출력 전압과 전류는 뚜렷한 상승세를 보였다. 이는 유체와 블레이드 간 접촉 면적 확대와 효율적인 운동 에너지 전달에 기인한 결과로 해석된다. 그러나 블레이드 수가 5개를 초과하면 전기적 출력(전압, 전류) 증가 폭이 감소하는 경향을 나타냈으며, 이는 유동 저항 증가와 회전 관성 확대에 따른 효율 저하로 판단된다.
- 3) 블레이드 수 증가에 따른 토크 분석 결과, 초기 구간에서는 토크가 뚜렷하게 증가하였으나, 블레이드 수가 5개를 초과하면서 증가율이 점차 감소하는 경향이 나타났다. 이는 블레이드 간 간격 축소로 인한 유동 저항 증가 및 난류 발생, 관성 모멘트 증가 등에 기인하는 것으로 해석된다. 특히 블레이드 수 5개 조건에서 다른 블레이드 수(2개, 3개, 4개)보다 더 높은 평균 토크가 기록되었으며,

이는 토크 성능 측면에서의 임계점으로 판단된다. 따라서 블레이드 수 최적화는 사이펀 수차의 성능 향상을 위한 핵심 설계 요소임을 시사한다.

- 4) 실험 결과, 사이펀 관로 내 공기 유입은 수차의 출력 저하를 유발하였으며, 이를 저감하기 위해 유입구 형상 개선, 밀폐성 향상, 공기 제거 장치 도입이 요구된다. 저유량 조건에서는 블레이드 수 변화에 따른 성능 차이가 제한적이었으나, 상부 수조 수심 증가는 전압, 전류, 토크, 회전수 등 주요 성능 지표에 유의미한 향상을 가져왔다. 이는 수심 증가로 인한 낙차 변화가 유량 및 압력 조건에 영향을 주어 회전력 형성을 강화한 결과로 해석된다. 특히 블레이드 5엽 조건에서 수심을 소폭 증가시켰을 때 모든 성능 지표가 향상되었다. 따라서 마이크로 사이펀 수차의 최적 성능 확보를 위해 블레이드 수, 수심, 유량 조건을 종합적으로 고려한 설계가 필요하다.

본 연구는 사이펀 수차의 설계 최적화 및 성능 개선을 위한 기초 자료로 활용될 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 수차의 위치, 블레이드의 형상(곡률, 두께 등) 및 설치 각도 등의 변수도 함께 고려하여 보다 정밀한 최적 설계 조건을 도출할 필요가 있다.

#### 사 사

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

#### References

- Alidai, A and Pothof, IWM (2015). Hydraulic performance of siphonic turbine in low head sites, *Renew. Energy* 75, pp. 505–511. [https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.10.022]
- Breyer, C (2020). A global overview of future energy, *Future Energy*, pp. 727–756. [DOI:10.1016/B978-0-08-102886-5.00034-7]
- Carrelhas, AAD, Gato, LMC, Henriques, JCC and Marques, GD (2023). Estimation of generator electrical power output and turbine torque in modelling and field testing of OWC wave energy converters, *Energy Conversion and Management: X* 19 100384. [https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100384]
- Crane C (2018). Flow of Fluids Through Valves, Fittings, and Pipe, Technical Paper No. 410M.
- Dechamps, P (2023). The IEA world energy outlook 2022 – a brief analysis and implications, *Eur. Energy Climate J.* 11 pp. 100–103. [https://getready4.eu/the-iea-world-energy-outlook-2022-a-brief-analysis-and-implications/]
- Eller, JD (1982). Hydraulic turbine system with siphon action, Patent US4364228A.

- Guerra, J, Velásquez, L, Rubio-Clemente, A, Jaramillo, L and Chica, E (2024). Design and optimization of a siphon turbine using the response surface methodology, *Results in Eng.* 22 102241. [DOI:10.1016/j.rineng.2024.102241]
- Holland, R (1983). Micro-Hydro Electric Power, Intermediate Technology Development Group, England.
- Idelchik, IE (2006). *Handbook of Hydraulic Resistance* (3rd ed.). Begell House.
- 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>]
- Krylov, AP, Bakshtanin, AM and Beglyarova, ES (2021). Experimental studies of micro-hydropower plants with siphon water intake, *Power Technol. Eng.* 55, pp. 321–325. [10.1007/s10749-021-01359-3]
- Loots, I, Van Dijk, M, Barta, B, Van Vuuren, SJ and Bhagwan, JN (2015). A review of low head hydropower technologies and applications in a South African context, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 50, pp. 1254–1268. [<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.064>]
- Mardiana-Euers, E (2013). A Study of Low head Hydropower using a siphon system and conversion to air pressure, Ph. D. Dissertation, PQDT-UK & Ireland. [<https://eprints.lancs.ac.uk/id/eprint/133374>]
- Martinez, JJ, Deng, ZD, Klopries, E.-M, Mueller, RP, Titzler, PS, Zhou, D, Beirao, B and Hansten, AW (2019). Characterization of a siphon turbine to accelerate low-head hydropower deployment, *J. Clean. Prod.* 210, pp. 35–42. [DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.10.345]
- Miller, DS (1990). Internal Flow Systems: Design and Performance Prediction, 2nd Ed., 326, BHRA, Cranfield, UK.
- Mott, RL and Untener, JA (2015). Applied Fluid Mechanics (7th ed.). Pearson.
- Sari, MA, Badruzzaman, M, Cherchi, C, Swindle, M, Ajami, N and Jacangelo, JG (2018). Recent innovations and trends in in-conduit hydropower technologies and their applications in water distribution systems, *Journal of Environmental Management* 228, 15 December 2018, pp. 416–428. [DOI:10.1016/j.jenvman.2018.08.078]
- Stark, BH, Andò, E and Hartley, G (2011). Modelling and performance of a small siphonic hydropower system, *Renew. Energy* 36, pp. 2451–2464. [DOI: 10.1016/j.renene.2011.02.012]
- Zhou, D, Gui, J, Deng, ZD, Chen, H, Yu, Y, Yu, A and Yang, C (2019). Development of an ultra-low head siphon hydro turbine using computational fluid dynamics, *Energy* 181, pp. 43–50. [<https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.05.060>]
- White, F. M (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill. [DOI:10.13140/RG.2.2.21339.62244]