

마이크로 급 펄톤 터빈의 설계와 공기주입에 따른 성능 분석

박현수* · 양호성*** · Batbeleg Tuvshintugs* · 김인철**** · 이영호**,***†

Micro Pelton Turbine Design and Performance Analysis for Air Injected Operation

Hyeon Soo Park*, Ho Seong Yang***, Batbeleg Tuvsingtugs*, In Cheol Kim****, Young Ho Lee**,***†

Key Words : Pelton turbine(펠톤 터빈), Air injection(공기 주입), Rotational speed(회전 속도), Efficiency(효율)

ABSTRACT

In this study, a new efficiency improvement method by means of air injection into Pelton turbine jet is presented. In order to analyze air injected jet performance, firstly, micro size 5kW Pelton turbine was designed and analyzed. Similarly the analysis was carried out on a small size 100kW turbine. For the 100kW Pelton turbine, 5kW model was scaled up based on the jet diameter and rotational speed. 5kW performance analysis was performed under several rotational speed. After achieving optimized rotational speed. Air injected jet analysis was performed for rated rotational speed condition. Air injection rate was 1%, 5%, 10%, 15% of the water volume flow rate. Efficiency increase rate was reliable. The 100kW turbine was designed in two types, one jet and two jets systems. Air injection rate was made same and also found to have a reliable increase in efficiency.

1. 서론

오늘날 에너지 생산으로 인한 환경오염은 현대 문명의 가장 큰 문제 중 하나가 되고 있다. 화석 연료를 기반으로 한 에너지 생성은 기후 변화와 매장량의 고갈로 인해 신뢰성이 없어지고 있으며, 재생 가능한 에너지는 미래의 지속적 이용이 가능한 원천으로 각광받고 있다. 수력 발전은 다른 재생 가능 에너지 기술 중에서도 가장 효율적이고 안정적인 에너지 생산 기술로 간주된다.⁽¹⁾ 최초의 수력발전 중 하나는 곡물 분쇄와 같은 기계를 위한 것이었지만 현대의 수력 발전소는 터빈과 발전기를 사용하여 전기를 생산한다. 물에 의해 생성된 에너지는 로터를 회전시키고 전자기 발전기에 의해 전기를 생성한다.⁽²⁾ 수력 발전에 주로 이용 되는 수차의 종류로는 Pelton, Francis 및 Kaplan 수차가 있으며, 그 중 수두가 높고 유량이 낮은 지역의 경우 Pelton 수차가 가장 이상적이다. 반대의 경우에는 반력이 임펠러의 회전을

담당하기 때문에 Francis 수차가 선호된다. 터빈 유형에 따른 효율적인 작동 영역이 Fig. 1에 나와 있다.

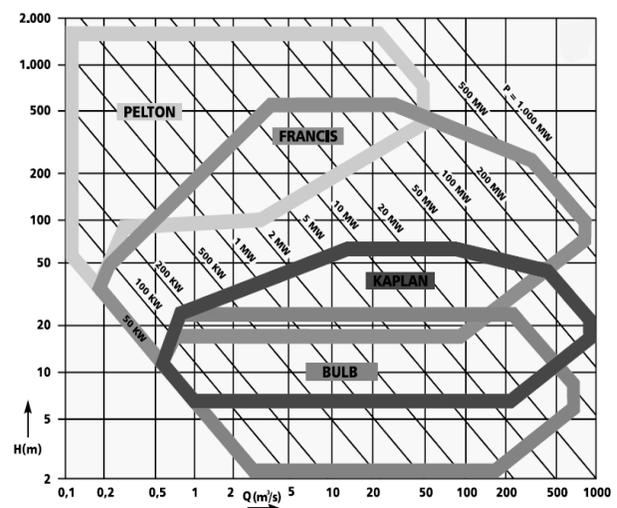


Fig. 1 Turbine Selection Chart

* 한국해양대학교 기계공학과(Department of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

** 한국해양대학교 기계공학부(Division of Mechanical Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

*** 한국해양대학교 해양신재생에너지융합전공(Interdisciplinary Major of Ocean Renewable Energy Engineering, Korea Maritime and Ocean University)

**** 녹색에너지기술연구원 풍력·해양연구실 (Wind·Ocean Power R&D Dept., Green Energy Institute)

† 교신저자, E-mail : lyh@kmou.ac.kr

이 3 개의 수차 중 Pelton 터빈이 가지는 몇 가지 장점이 있다. 첫째, 높은 수두를 활용 할 수 있기 때문에 소형 장치에서 많은 전력을 생산 할 수 있다. 두 번째로, 쉽게 설치 할 수 있으며 셋째로, Pelton 터빈은 다양한 수두와 흐름에 사용될 수 있다. Francis 터빈의 프로펠러와 달리 Pelton 터빈은 특정 조건을 위해 설계 할 필요가 없으므로 러너를 만들어 재고를 보관 할 수 있다. 마지막으로, 러너는 주변에 공간이 있어 대부분의 다른 유형의 터빈보다 훨씬 쉽게 검사하고 작업 할 수 있다.⁽³⁾

CFD를 기반으로 하는 Pelton 터빈의 연구는 1990년대 후반부터 시작되어 점차 중요성이 대두되고 있다.⁽⁴⁻⁸⁾ Pelton 버킷에서의 CFD 해석은 Pelton 터빈의 복잡한 흐름을 조사하기 위한 방법으로 적합하다고 볼 수 있다. CFD 해석 유효성 확인의 필요성은 CFD 해석이 Navier-Stokes 방정식을 푸는 데 있어서 특정 및 다른 난류 모델을 사용한다는 사실에 근거한다. 최적의 모델을 선택하기 위해 모든 수치해석 도구와 난류 모델은 정확도와 비용이 고려된다.⁽⁹⁾ 실험적 접근 방식을 기반으로 하는 터빈의 설계는 많은 비용과 시간이 소요된다. 따라서 이번 연구에서는 유동 현상에 대해 보다 깊이 있게 분석할 수 있는 합리적인 대안으로써, 전산 유체 역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)을 이용하여 Pelton 터빈의 출력 및 성능 향상에 대하여 분석하였다. Pelton 터빈 분사 제트로의 공기주입을 통하여 증가하는 출력 및 성능을 일반적인 Pelton 터빈과 비교하였으며 단일 노즐의 분사와 이중 노즐의 분사의 경우에 대해 각각의 출력과 효율을 비교하였다.

2. 펠톤 수차의 이론

2.1 펠톤 수차의 원리

수력 발전의 원리는 물의 저장된 곳과 터빈의 높이차이 즉, 유체의 위치에너지를 이용하여 발전한다. 원칙적으로, 터빈은 댐의 수위보다 훨씬 낮은 고도에 위치하는데 이 높이 차이를 일반적으로 수두라고 한다. 물은 댐에서 터빈으로 전달되는 과정에서 위치에너지를 보다 유용한 운동 에너지

지로 전환시키고 노즐을 이용하여 유체에 고속 제트를 생성한다. 아래의 Bernoulli 방정식을 사용하여 유체의 속도를 계산할 수 있으며 여기서 마찰로 인한 시스템의 손실은 고려하지 않는다.

$$v_1 = \sqrt{2gH} \tag{1}$$

2.2 펠톤 수차의 속도삼각형

성능 평가를 위한 효과적인 도구인 상대 속도 및 속도 삼각형은 터빈 기관에서 유체 속도의 여러 구성 요소를 나타내는 속도 다이어그램이다. Fig. 2는 Pelton 터빈의 속도 삼각형을 나타낸다. 이는 유체 제트와 터빈 버킷 사이의 상호 작용을 보여준다.

진입 전, 제트기는 초기 속도 v_1 로 움직이고 회전중인 버킷과 제트 간의 상대 속도는 다음과 같다.

$$v_{r1} = v_1 - u \tag{2}$$

입구에서, 초기 속도의 수평 성분(v_{w1})은 초기 속도 (v_1)와 동일하다. 유체 흐름은 2개의 동일한 버킷으로 나누어지는데 버킷의 형상학적 대칭으로 인해 분석은 한쪽만 진행하였다. 제트는 x축 양의 방향에서 반시계 방향으로 일정 각도를 이루며 버킷에서 빠져 나오는데 이는 일반적으로 165~170°를 이룬다. 이상적인 경우 출구와 입구의 상대 속도는 동일하여야 하지만 마찰과 같은 실제적인 요소에 의해 유체가 버킷 표면을 흐를 때 유체 속도를 늦추므로 출구에서의 상대 속도가 입구에서의 상대 속도보다 작게 된다.

2.3 출력 및 효율

버킷이 받는 동력은 아래의 식처럼 단순히 버킷의 충격력과 버킷 속도의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$P = F_{bucket} \cdot u = [\dot{m}_w v_{r1} (1 - k \sin(180 - \theta))] \cdot (u) \tag{3}$$

효율은 식 (4)와 같이 노즐을 빠져 나올 때 유체 제트 힘에 대한 버킷에 전달되는 동력의 비율로 표현 할 수 있고, 유체 제트의 힘은 식 (5)와 같이 표현 할 수 있다.

$$n_h = \frac{2u(v_{r1}(1 - k \sin(180 - \theta)))}{v_1^2} \tag{4}$$

$$P = \dot{m}_w \left(\frac{v_1^2}{2} \right) \tag{5}$$

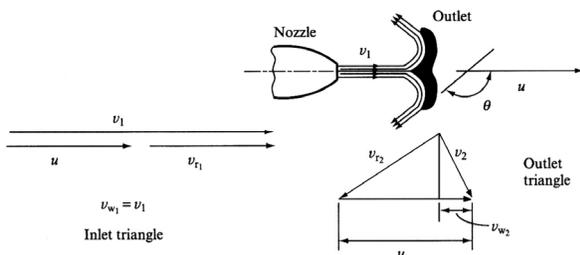


Fig. 2 Velocity Triangle for Pelton Turbine

공기 주입에 따른 출력 및 효율은 기존 펄톤 터빈의 계산식과 다른 방정식을 이용하여 주입된 공기의 유량과 정적 압력을 고려하여 계산하였다. 주입된 공기에 의한 에너지는 식 (6)과 같이 공기의 유량, 정압 및 시간의 곱으로 표현된다. 수두 내의 공기의 정압(P_s)은 공기가 주입된 수두 단면에 베르누이 방정식을 적용하면 식 (7)과 같이 도출되며, 이를 바탕으로 공기가 주입됨에 따른 터빈의 효율은 식 (8)과 같다.

$$W_{\in j} = Q_{air} \cdot P_s \cdot t \quad (6)$$

$$\rho g H = P_s + \frac{\rho V_w^2}{2} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{T \cdot w}{\rho g H Q + W_{\in j}} \quad (8)$$

Pelton 터빈 설계의 주요 목표는 최대한의 효율을 달성하는 것이므로 이것은 터빈이 워터 제트로부터 최대 동력을 끌어 내야한다는 것을 의미한다. 동력은 버킷 속도와 충격력의 곱이므로 충격력과 버킷에 작용하는 힘이 모두 최대일 때 최대 동력이 얻어진다. 이상적으로 가능한 버킷의 최대 속도는 제트 속도와 같지만 제트와 버킷이 같은 속도로 움직이게 되면 제트는 버킷에 충돌할 수 없기 때문에 충격력이 0이 되어 아무런 힘도 작용하지 않게 된다. 다른 한편, 최대 충격력은 버킷이 정지 상태 일 때 발생하는데 버킷이 움직이지 않게 되면 버킷 속도가 0이 되어 결국 발생 된 전력은 다시 0이 된다.

즉, 충격력과 버킷 속도의 최대 조건 모두에서 전력 추출은 0된다. 따라서 발생하는 동력이 최대가 되는 이상적인 최적 조건은 버킷 속도가 제트 속도의 중간 일 때 발생하며 이러한 조건에서 Pelton 터빈은 90%의 높은 효율을 보여준다. 그러나 실제로는 버킷 속도와 제트속도의 비가 0.5보다 약간 작은 0.42~0.48 사이에서 최고 효율이 나타난다.⁽¹⁰⁾

3. 펄톤 수차 설계

3.1 펄톤 수차의 치수기준

Pelton 휠의 치수 지정에는 몇 가지 일반적인 기준이 있다. 수두 및 유속은 Pelton 터빈을 설계 할 때 터빈의 적정 전력과 크기를 결정하는 중요한 변수로 터빈의 설계는 Pelton터빈 휠의 치수 선정, 회전 속도의 선정 및 인젝터 개수를 결정하면서 시작된다.⁽¹¹⁾

Pelton 터빈의 기본 치수는 이러한 모든 기준을 조합하여 정의 할 수 있으며 설계의 나머지 변수는 이러한 기본 치수에 따라 정의 할 수 있다.

$$k = \frac{u}{v_1} = \frac{u}{\sqrt{2gh}} \quad (9)$$

$$n_q = n \frac{\sqrt{\dot{Q}_{jet}}}{H^{\frac{3}{4}}} \quad (10)$$

- 제트 속도비 k의 범위는 0.45에서 0.48이어야 한다.
- 버킷의 넓이는 제트 지름의 약 3배로 설계한다.
- 비속도(rps)는 0.13미만이어야 한다.

식 (9)은 제트 속도 v_1 에 대한 버킷 속도 u 의 비 k를 나타내고 식 (10)은 회전속도 n , 제트의 유량 \dot{Q}_{jet} 와 압력수두 H 의 관계식인 비속도(rps)를 나타낸다.

3.2 펄톤 수차 설계

5kW, 100kW 및 100kW 더블 노즐을 적용한 Pelton 수차의 설계 값들은 Table 1에서 볼 수 있다.

5kW급 수차와 100kW급 수차의 가용 수두는 동일하다는 가정 하에 유량을 증가시켜 출력을 맞추어 주었고, 회전속도, 버킷의 깊이와 길이 등 주요 변수들은 출력에 맞게 설계하였다.

Table 1 Design Parameters of 3 Types of Pelton Turbine

| Parameters | Unit | 5kW | 100kW | 100kW double nozzles |
|---------------------|------|-------|--------|----------------------|
| Head | m | 33 | 33 | 33 |
| Flow rate | l/s | 17.96 | 346 | 346 |
| Rotational speed | rpm | 750 | 169 | 84.5 |
| Number of jet | - | 1 | 1 | 2 |
| Jet speed ratio(k) | - | 0.46 | 0.46 | 0.46 |
| Jet speed | m/s | 25.37 | 25.37 | 25.37 |
| Jet diameter | mm | 30 | 132 | 132 |
| Peripheral speed | m/s | 11.73 | 11.67 | 11.67 |
| Runner diameter | mm | 300 | 1320 | 1320 |
| Bucket width | mm | 90 | 400 | 400 |
| Depth of the bucket | mm | 25 | 110 | 80 |
| Bucket Length | mm | 84 | 375 | 272 |
| Hydraulic power | kW | 5.8 | 111.78 | 111.78 |

4. 수치해석 기법

4.1 지배 방정식

운동량, 열 및 물질 전달의 과정을 설명하는 유체 흐름의 지배 방정식은 Navier-Stokes 방정식으로 알려져 있다.⁽¹²⁾ Navier-Stokes 방정식을 푸는 수치해법의 종류에는 유한차분법, 유한요소법 및 유한체적법이 있는데 CFX는 가장 보편적인 유한체적 기법을 사용한다. 이 기법에서, 해석 영역은 작은 체적으로 나누어지고, 도메인 전체의 특정 지점에서 각 변수 값의 근사 값을 얻어 유체 흐름을 전체적으로 해석한다. CFX에서 다상-다중 유체의 수치해석은 다음의 수송방정식인 연속방정식과 운동량방정식에 의해 계산된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha Y_{A\alpha}) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha Y_{A\alpha} - \rho_\alpha D_{A\alpha} (\nabla Y_{A\alpha}))) = S_{A\alpha} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(r_\alpha \rho_\alpha U_\alpha) + \nabla \cdot (r_\alpha (\rho_\alpha U_\alpha \otimes U_\alpha)) \\ & = -r_\alpha \nabla p_\alpha + \nabla \cdot (r_\alpha \mu_\alpha (\nabla U_\alpha + (\nabla U_\alpha)^T)) \\ & \quad + \sum_{\beta=1}^{N_p} (\Gamma_{\alpha\beta}^+ U_\beta - \Gamma_{\beta\alpha}^+ U_\alpha) + S_{M\alpha} + M_\alpha \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $r, \rho, Y, U, S, p, \Gamma$ 는 각각 체적분율, 밀도, 질량분율, 유속, Source, 압력, 확산성을 의미한다. 각 함수의 아래첨자로 표시되어 있는 기호 중 α, β, γ 는 서로 다른 상을 의미하고 $A, B, C..$ 는 서로 다른 성분을 의미한다.

4.2 난류 모델

가장 널리 사용되는 난류 모델로는 k-ε turbulence model 및 Wilcox k-ω turbulence model, Shear stress transport model이 있다. Wilcox 모델은 자유 흐름 조건에 대한 민감도가 높다는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 표면부에는 k-ω 모델을, 외부영역에는 k-ε를 사용하는 BSL k-ω 모델이 Menter에 의해 만들어졌다.⁽¹³⁾ 하지만 BSL k-ω 모델은 부드러운 표면에서의 박리현상에 대해 정확한 해석이 불가능하다는 단점이 있다. 본 연구는 박리현상과는 무관하기 때문에 k-ε turbulence model과 Wilcox k-ω turbulence model의 장점에 근거하는 Shear stress transport model을 사용하였다. 2상(액체, 기체)과 2중(물, 공기) 해석을 수행하기 위해 SST모델을 적용한 해석방식은 CFX에서 가장 정확한 결과를 제공한다.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

5. 결과 및 토론

5.1 회전속도에 따른 5kW 수차의 성능

5kW 수차의 성능분석 및 최적 회전속도를 도출하기 위해 Fig. 3에서와 같이 550 rpm에서 950 rpm까지 5가지 케이스가 연구되었고 그에 따른 결과는 Table 2에 나와 있다. Table 2에서는 수두, 유량, 제트 속도는 동일하다는 조건에 rpm에 따른 수차의 출력과 효율 및 제트 속도비를 나타내었다. 회전속도가 750 rpm일 때 최고 효율을 얻었으며 그에 상응하는 터빈의 전력은 4.93kW이었다. 또한, 터빈의 효율이 최대일 때 제트 속도비 k값은 0.46으로 얻어졌으며, 이 값은 일반적인 Pelton 수차의 제트 속도비 값의 범위에 있다. 고효율 Pelton 터빈의 전형적인 제트 속도비는 0.45~0.48의 범위를 갖는데, 5kW 수차의 회전속도가 750 rpm일 때 속도계수가 0.46로 계산되었고 이는 고효율 범위 내의 값을 알 수 있다.

또한, 최고 효율 값은 85.39%로 소수력 펠톤 터빈임을 고려할 때 매우 높은 편이다. 따라서 이 5kW급 수차 설계 모델이 신뢰할 수 있는 수준이며 향후 다른 연구에도 사용될 수 있음을 보여준다.

Table 2 Case Study of the 5kW Pelton Turbine Analysis

| Case | Head [m] | Flow rate [kg/s] | Jet speed [m/s] | Hydraulic Power [kW] | Rotational speed [rpm] | Efficiency [%] | Power [kW] | Velocity coefficient |
|------|----------|------------------|-----------------|----------------------|------------------------|----------------|------------|----------------------|
| 1 | 32.8 | 17.96 | 25.37 | 5.77 | 550 | 77.77 | 4.49 | 0.34 |
| 2 | | | | | 650 | 82.55 | 4.76 | 0.40 |
| 3 | | | | | 750 | 85.39 | 4.93 | 0.46 |
| 4 | | | | | 850 | 84.34 | 4.86 | 0.53 |
| 5 | | | | | 950 | 76.93 | 4.44 | 0.59 |

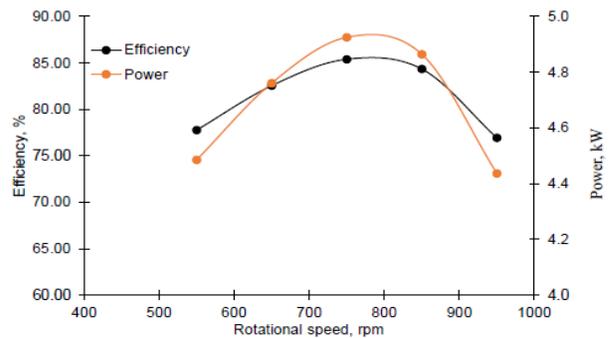


Fig. 3 Runner Efficiency and Power with Rotational speed

5.2 공기 주입에 따른 5kW 수차의 성능

5.2.1 공기 주입 방법

파이프라인 단면을 일정하게 유지하면서 노즐 파이프에 일정량의 공기 주입을 추가하면 유량의 증가로 인해 하류 속도가 증가하게 되는데 이렇게 증가된 혼합물의 속도는 더 많은 운동 에너지를 생성하여 러너에 더 많은 힘을 준다. Fig. 4는 일반적인 수차의 노즐에 흐르는 작동 상태를, Fig. 5는 노즐에서 공기를 주입하는 원리를 보여준다. Fig. 6에서는 노즐 단면에 대한 유체 내부에 고르게 분포된 공기의 분포를 가시화 하였다.

5.2.2 공기 주입에 따른 수차의 성능 비교

제트에 공기를 주입한 후, 혼합물의 속도는 예상대로 증가 하였다. 따라서 터빈은 더 높은 운동에너지를 이용하여 많은 전력을 생산 할 수 있다. Table 3은 공기 주입량 1%에서 15%까지의 4가지 경우에 대한 결과이다. 공기 주입으로 인해 유체의 밀도는 점점 감소하지만 유체의 속도, 터빈의 출력 및 효율이 공기 유량 비율이 증가함에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서 수차의 출력과 효율도 증가하게 된다. Fig. 7과 Fig. 8은 일반 수차의 출력과 공기주입량에 따라 증가하는 수차의 출력과 효율을 비교한 그래프이다. 공

기주입량이 15%일 때, 출력은 32.66%, 효율은 11.53%가 증가하였다.

5.3 공기 주입 유무에 따른 100kW 단일 노즐 펄톤수차의 성능 비교

일반적인 작동 조건은 5kW 터빈과 동일하지만 유입구 경계 조건에서 유량만 변경하여 수행하였다. 5kW 터빈과 동일한 수두를 조건으로 하기에 유량을 17.96l/s에서 346l/s로 변경하여 100kW 터빈을 설계하였다. Table 4는 일반적인

Table 3 Air Injected Jet Results

| Case | Air Percentage [%] | Mixture Density | CFD Velocity [m/s] | Water Mass Flow [kg] | Available Hydraulic Power [kW] | Normal Operation Power [kW] | Turbine Power [kW] | Efficiency [%] |
|------|--------------------|-----------------|--------------------|----------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------|----------------|
| 1 | 1 | 987.04 | 25.76 | 8.98 | 5.94 | 4.93 | 5.01 | 84.73 |
| 2 | 5 | 947.21 | 26.85 | 8.98 | 6.17 | 4.93 | 5.4 | 87.53 |
| 3 | 10 | 897.43 | 28.34 | 8.98 | 6.46 | 4.93 | 5.95 | 92.12 |
| 4 | 15 | 847.64 | 30.00 | 8.98 | 6.75 | 4.93 | 6.54 | 96.92 |



Fig. 4 Scheme of Normal Operation Condition

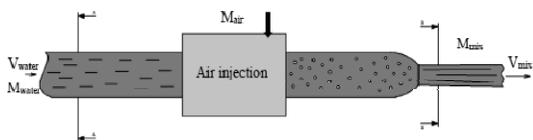


Fig. 5 Air Injection Scheme in the Nozzle

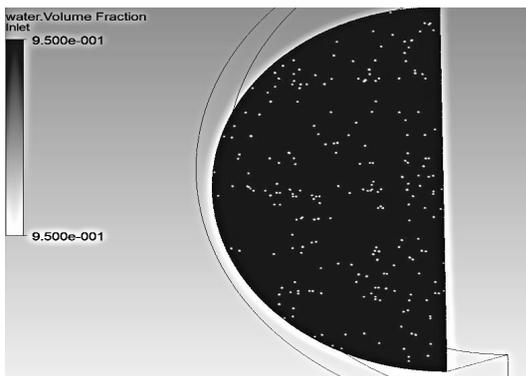


Fig. 6 Visualization of Air Distribution on the Inlet Boundary (Air injection rate 5% of the water)

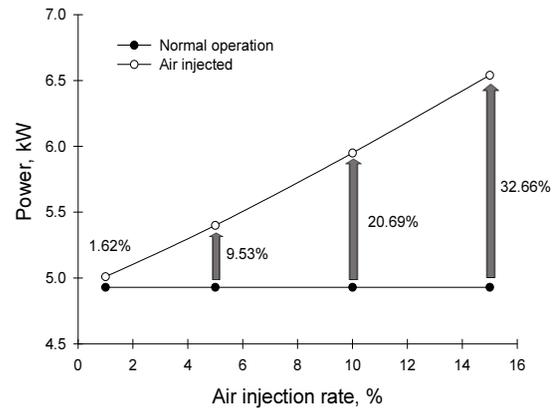


Fig. 7 Power Comparison of Normal and Air Injected Operation in 5kW Pelton Turbine

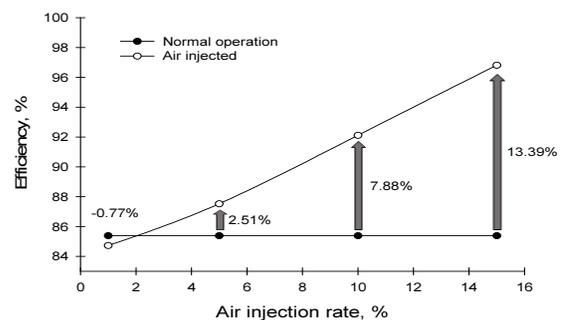


Fig. 8 Efficiency Comparison of Normal and Air Injected Operation in 5kW Pelton Turbine

Table 4 100kW Pelton Turbine Performance

| | |
|---------------------------------|-------|
| Water Mass Flow Rate [kg/s] | 316 |
| Jet Velocity [m/s] | 24.58 |
| Available Hydraulic Energy [kW] | 101 |
| Turbine Power [kW] | 84.51 |
| Efficiency [%] | 85.3 |

Table 5 Air Injected Jet Results for 100kW Turbine

| | Head [m] | Flow rate [kg/s] | Jet speed [m/s] | n [rpm] | Power [kW] | Efficiency [%] |
|-------------------|----------|------------------|-----------------|---------|------------|----------------|
| Normal Operation | 32.6 | 316 | 24.58 | 169 | 84.51 | 85.3 |
| 1% air injection | | | 24.82 | | 85.93 | 84.15 |
| 5% air injection | | | 25.83 | | 93.09 | 87.35 |
| 10% air injection | | | 27.23 | | 103.16 | 91.99 |
| 15% air injection | | | 28.78 | | 115.80 | 98.45 |

100kW 펠톤 터빈의 출력 및 효율을 나타내고 Table 5는 공기주입에 따른 100kW 수차의 효율 및 출력을 보여준다. Table 4에 따르면 100kW 펠톤 수차가 5kW 펠톤 수차와 효율이 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 기하학적 상사와 가용 수두가 동일한 점에서 비롯되기 때문이다. Table 5에서도 앞선 5kW 펠톤 수차의 결과와 같이 공기주입량을 15%까지 증가시키면 출력은 약 37%, 효율은 13%가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10에서는 일반 수차의 성능과 공기주입에 따른 성능 차이를 그래프로 표현하였다.

5.4 이중 노즐 100kW 펠톤 수차의 성능 비교

이중 노즐의 펠톤 수차 분석 결과는 Table 6에 나와 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 일반적인 수차에 대해 이중 노즐터빈의 동력과 효율 증가율을 각각 나타낸다. Fig. 11과 Fig. 12에 따르면 이중 노즐 분사식 100kW 펠톤수차는 일반적인 100kW 수차보다 출력은 35%, 효율은 13%가 증가하였다.

Table 5와 Table 6을 비교해보면 두 개의 노즐이 적용된

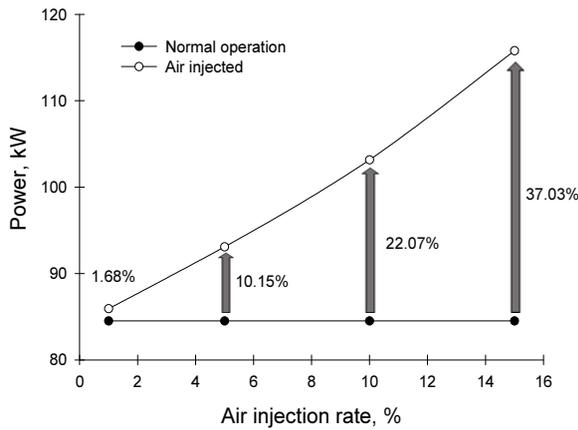


Fig. 9 Power Comparison of Normal and Air Injected Operation in 100kW Pelton Turbine

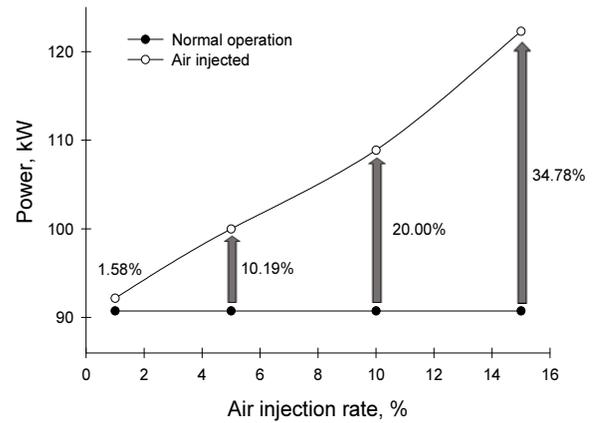


Fig. 11 Power Comparison of Normal and Air Injected Operation in 100kW Pelton Turbine with Two Nozzle

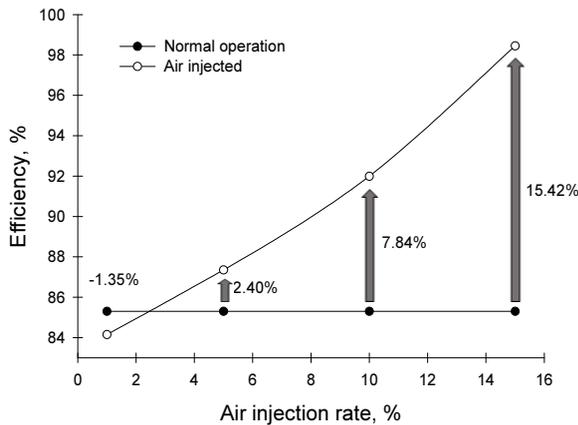


Fig. 10 Efficiency Comparison of Normal and Air Injected Operation in 100kW Pelton Turbine

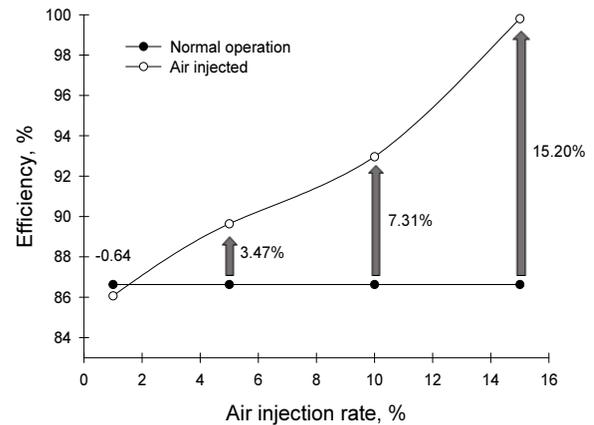


Fig. 12 Efficiency Comparison of Normal and Air Injected Operation in 100kW Pelton Turbine with Two Nozzle

Table 6 Air Injected Results for 100kW Turbine with Two Nozzles

| | Head [m] | Flow rate [kg/s] | Jet speed [m/s] | n [rpm] | Power [kW] | Efficiency [%] |
|-------------------|----------|------------------|-----------------|---------|------------|----------------|
| Normal Operation | 32.6 | 346 | 24.58 | 235 | 90.74 | 86.63 |
| 1% air injection | | | 25.00 | | 92.17 | 86.07 |
| 5% air injection | | | 26.05 | | 99.99 | 89.64 |
| 10% air injection | | | 27.5 | | 108.88 | 92.96 |
| 15% air injection | | | 29.2 | | 122.3 | 99.8 |

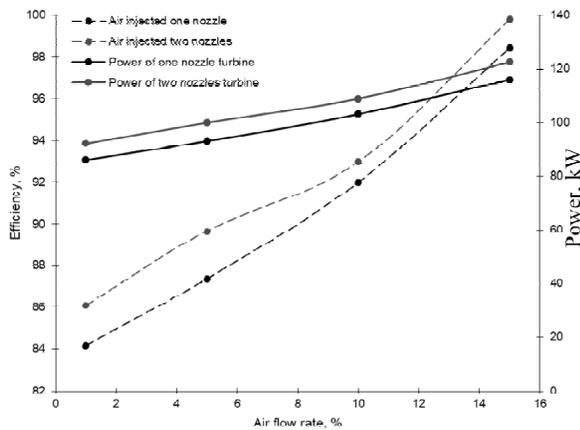


Fig. 13 Comparison of Power and Efficiency of Air Injected Operation of One and Two Nozzle 100kW Turbine

모델이 단일 노즐보다 높은 터빈 출력을 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 이를 그래프로 표현한 Fig. 13에서는 단일 노즐 펄톤 수차와 이중 노즐 펄톤 수차의 출력 및 효율을 비교 할 수 있다. 여기서 이중 노즐이 적용된 모델이 단일 노즐 펄톤 수차의 출력과 효율보다 높은 이유는 노즐에서 분출되는 제트에 의해 부분 부하를 받는 면적이 넓을수록 출력과 효율이 증가하는 펄톤 수차의 자연적인 특성에 의해 발생한다.

6. 결론

본 연구는 Pelton 터빈에 워터 제트로의 공기 주입 방식을 통해 터빈 효율을 향상시키는 새로운 방법을 구현하는 것을 목표로 하였다. 터빈 효율 향상을 위해 5kW 및 100kW 급 Pelton 터빈에 대하여, 일반적 터빈의 성능과 공기 주입을 적용한 터빈의 성능에 대하여 연구가 수행되었다.

본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 공기 주입량을 1%에서 15%까지 증가시키면 출력과 효율은 선형적으로 증가하는 추세를 보였고 단일 노즐의

분사의 경우보다는 이중 노즐의 분사에서 높은 출력과 효율을 확인할 수 있었다.

- 2) 5kW급 Pelton 터빈은 550에서 950rpm까지 100rpm의 간격을 둔 5가지 실험 케이스가 수행되었고, 그에 따른 제트 속도 비의 범위는 0.34에서 0.59였다. 최대 효율은 750 rpm의 회전 속도에서 85.39%이고 그에 대응하는 제트 속도 비는 0.46이었다. 이 효율은 소수력 발전 펄톤 터빈에 대해 신뢰할 만한 값이며, 일반적인 제트 속도 비의 값과 잘 일치하였다.
- 3) 공기 주입 분석이 포함된 5kW 터빈은 물에 대한 체적 유량이 1%에서 15%까지 변화하는 4개의 케이스에 대해 수행되었다. 공기 주입이 증가하면 터빈의 전력이 선형 적으로 증가한다. 공기 주입량 1%의 효율은 -1.02% 감소했으며 15%의 공기 주입 효율은 11.53% 증가했다.
- 4) 100kW Pelton 터빈의 경우, 속도 계수는 5kW 분석에서 이미 정격으로 판단된 0.46으로 설정하였다. 일반 운전 조건에서 효율은 85.33%이었고 1%에서 15%까지의 공기 주입 조건에서 효율은 -0.36%에서 13.94%까지 증가하였다.
- 5) 100kW 더블 노즐 Pelton 터빈의 경우 효율 변화는 공기 분사율이 1%에서 15% 사이일 때 -0.56%에서 13.2%로 나타났다. 또한 단일 노즐 Pelton 터빈과 비교하였을 때 상대적으로 더 높은 전력과 효율을 확인하였다.

References

- (1) Boyle, Godfrey. Renewable Energy: Power for a sustainable future. 3rd ed., Oxford, Oxford University Press in association with Open University, pp. 185-235, 2012.
- (2) Chennu, Vinodh Reddy. "Comparison between Impulse Turbine and Reaction Turbine" ME Mechanical, me-mechanicalengineering.com/comparison-between-impulse-turbine-and-reaction-turbine, 2017.
- (3) Thake, Jeremy. The Micro-Hydro Pelton Turbine Manual: Design, Manufacture and Installation for Small-scale Hydropower. Practical Action Publishing, pp. 11-87, 2011.
- (4) Perrig, Alexandre, et al. "Hydrodynamics of the free surface flow in Pelton turbine buckets." Thèse Ecole polytechnique fédérale de Lausanne EPFL, No 3715, Faculté des sciences et techniques de l'ingénieur STI, Section de génie mécanique, Institut des sciences de l'énergie ISE (Laboratoire de machines hydrauliques LMFH). Dir.: François Avellan, Mohamed Farhat, 2007.
- (5) Židonis, Audrius, and George A. Aggidis. "Pelton turbine: Identifying the optimum number of buckets using CFD." Journal of Hydrodynamics, Ser. B, Vol. 28,

- No. 1, pp. 75–83, 2016.
- (6) Lorents, Fjellanger Barstard. CFD Analysis of a Pelton turbine, Norwegian University of Science and Technology, 2012.
- (7) Panagiotopoulos, A., et al. “Flow Modeling in Pelton Turbines by an Accurate Eulerian and a Fast Lagrangian Evaluation Method.” *International Journal of Rotating Machinery*, Vol. 2015, pp. 1–13, 2015.
- (8) Perrig, Alexandre, et al. “Flow in a Pelton Turbine Bucket: Numerical and Experimental Investigations.” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 128, No. 2, p. 350, 2006.
- (9) Židonis, Audrius, and George A. Aggidis. “State of the art in numerical modelling of Pelton turbines.” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 45, pp. 135–144, 2015.
- (10) Zhang, Zheng-Ji. *Pelton Turbines*. Springer International Publishing, pp. 13–234, 2016.
- (11) Brekke, H. “Recent trends in the design and layout of Pelton turbines.” *International Water Power and Dam Construction IWPCDM* 39,11, pp. 123–150, 1987.
- (12) Çengel, Yunus A., and John M. Cimbala. *Fluid mechanics: fundamentals and applications*. McGraw-Hill Education, pp. 446–451, 2018.
- (13) Menter FR, Two equation eddy viscosity turbulence for engineering applications. *AIAA-Journal*, Vol. 32(8): pp. 1598–1605, 1994.
- (14) Rossetti, A., Pavesi, G., Cavazzini, G., Santolin, A. and Ardizzon G., “Influence of the bucket geometry on the Pelton performance.” *J Power Energy*, Vol. 228, pp.13, 2014.
- (15) Santolin, A., Cavazzini, G., Ardizzon, G. and Paversi, G., “Numerical investigation of the interaction between jet and bucket in a pelton turbine.” *J Power Energy*, Vol. 223, pp. 8, 2009.
- (16) Wang, T., Wang, C., Kong, F., Gou, Q. and Yang, S., “Theoretical, experimental, and numerical study of special impeller used in turbine mode of centrifugal pump as turbine.” *Energy*, Vol. 130, pp. 473–485, 2017.