

잉여 유출수를 이용한 소수력발전용 수차의 유동특성 해석 및 시험

정선용¹, 이계복^{*}
¹충북대학교 기계공학부

Flow characteristics analysis and test in the Pelton turbine for pico hydro power using surplus water

Jeong, Seon Yong¹, Lee, Kye Bock^{*}

¹School of Mechanical Engineering, Chungbuk National University

요약 대형 빌딩에 설치된 냉각탑의 순환수를 이용한 소수력 발전용 수차를 개발하기 위해 펠톤 수차설계를 상용코드인 CFX를 사용한 전산유체 해석을 통해 수행하였다. 소수력 발전용 펠톤 수차의 최적설계를 구하기 위해 파이프 단면에 적합한 형태로 펠톤 휠을 절단한 버킷 모양과 버킷 개수 등 관련 주요 설계 인자를 변화시키며 수차 특성을 해석하여 수차 성능에 대한 영향을 평가하였다. 전산수치 해석에 의한 펠톤 수차설계 방법을 검증하기 위해 축소된 크기의 수차를 제작하고 실험을 통한 벤치마크 시험을 수행하였다. 초음파유량계와 압력 트랜스듀서, 오실로스코프를 사용하여 측정된 유동특성과 출력을 수치해석 결과와 비교하여 수치해석 설계방법의 타당성을 증명하였다. 또한 전산수치 해석을 통해 원하는 출력을 얻기 위한 버킷의 모양과 개수를 선정하여 냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 건물 내의 냉각수 순환평균속도는 1.2 m/s이고 빌딩의 높이는 30 m인 경우에 대해 순환하는 냉각수인 잉여수를 이용한 kW급 소수력 발전용 펠톤 수차의 개발 가능성을 확인하였다.

Abstract Computational fluid numerical analysis using the commercial code CFX was performed to develop a Pelton turbine for a pico hydro power generator using the circulating water of a cooling tower in a large building. The performance of the Pelton turbine was examined for different design factors, such as the bucket shape, in which the Pelton wheel was connected in an appropriate manner to the pipe section, and the number of buckets in order to find the optimal design of Pelton turbine for a pico hydro power using surplus water. A benchmark test was carried out on the manufactured small scale Pelton turbine to validate the design method of the Pelton turbine by numerical analysis. The results obtained by comparing the flow characteristics and power output measured using the ultrasonic flowmeter, the pressure transducer and the oscilloscope with the numerical results confirmed the validity of the analytical design method. The possibility of developing Pelton turbines for kW class pico hydro power generators using surplus water with an average circulation velocity of 1.2 m/s for the chosen bucket shape and number of buckets in a 30 m high building was confirmed.

Keywords : Hydro power, Numerical analysis, Pelton turbine, Surplus water, Test

1. 서론

높은 위치에 있는 하천이나 저수지 물을 낙차에 의한 위치 에너지를 이용하여 수차의 회전력을 발생시키고 수차와 직결되어 있는 발전기에 의해서 전기에너지로 변환

시키는 방식이 수력발전(hydro power)이다.

대수력 발전의 경우 환경파괴에 따른 환경단체와 지역 주민의 반대 및 보상 문제, 발전시설 입지선정 등 국가에서 건설에 많은 어려움을 겪고 있다. 따라서 대수력 보다는 소규모 수력 건설을 통해 환경 피해를 최소화하

본 논문은 2014년도 충북대학교 학술지원연구사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Kye Bock, Lee(Chungbuk National University)

Tel: +82-43-261-3232 email: kblee@chungbuk.ac.kr

Received January 20, 2016

Revised (1st February 29, 2016, 2nd March 28, 2016)

Accepted April 7, 2016

Published April 30, 2016

는 소규모 수력발전 개발로 열악한 전력 생산 수율 및 환경을 개선 극복하여 국내외 시장의 요구에 부응할 수 있는 전력 생산성 향상을 꾀하고 있다. 초소수력 발전의 경우 잉여 자원을 통해 저비용 고효율(일반적인 수력 발전비율 80%)의 친환경 에너지를 생산할 수 있으며, 대수력·중수력 발전에 비해 주변 환경파괴가 거의 없이 설치가 가능하고 유지보수가 용이하며 전기 생산을 할 수 있는 미개발지점이 매우 많아 향후 발전가능성이 크다고 볼 수 있다[1-4].

대형 수영장 등에서 사용된 물을 방류하는 하수 방류관 또는 냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 순환하는 냉각수에 소규모 수력발전기를 간단하게 연결 설치하면 방류되는 물의 수력에 의해 수차부가 회전되면서 회전에너지를 전력에너지로 전환하여 안정적인 소규모 발전이 가능할 수 있다[5].

본 연구에서는 냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 순환되는 냉각수를 이용한 발전에 적합한 소규모의 수차 설계를 수행하였다. 건물 내의 냉각수 순환평균속도는 1.2 m/s이고 빌딩의 높이는 30 m인 조건에서 수치해석방법을 통해 Pelton wheel을 파이프 단면에 적합한 형태로 절단한 버킷(bucket)의 모양과 버킷 수에 따른 수차특성을 해석하여 수차성능에 대한 영향을 평가하였다. 수치해석 방법을 통해 잉여 유출수를 이용한 kW급 수력 발전장치를 개발하였고 본 연구에 사용한 수치 해석을 통한 설계 방법을 검증하기 위해 실험을 수행하여 해석모델의 타당성을 확인하였다.

2. 본론

본 연구에서는 냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 순환되는 냉각수를 이용한 발전에 적합한 수차를 설계하려고 한다. 30 m 높이의 냉각탑에서 순환하는 냉각수를 이용하여 직경 30 cm 관 속에 수차를 설치함으로써 냉각탑이 가지고 있는 위치 에너지를 이용하여 속도에너지로 변환 후 버킷을 회전시켜 전력을 생산하는 방식으로 구성하고자 한다. 이를 위해 관 내에 적절한 모양의 버킷을 설계 후 수치해석을 통해 유동특성을 해석하기 위해 CFD 상용코드인 CFX를 사용하였다. 또한 고정영역과 회전영역을 포함하는 내부 유동장의 격자생성은 ANSYS Mesh를 이용하고 비정렬 격자구조를 사용하였다. 3차원 비정상 유동에 대한 연속 방정식과 운동방정

식들은 직교좌표계에서 다음과 같은 형태를 갖는다[6].

연속 방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{u}_i) = 0 \quad (1)$$

운동방정식

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i u_j} \right) + g_i + F_i \quad (2)$$

여기서 $\rho, \tilde{u}_i, g_i, F_i$ 는 밀도, 순간 속도, 중력가속도, 외부 체적력을 나타낸다. 해석에 필요한 난류 모델을 선정 시 수차 내 베인(vane)의 회전 운동으로 인하여 유선의 휨과 와류 그리고 회전 등과 같은 유동 상태에 타당하다고 알려진 SST(Shear Stress Transport) 모델을 사용하였다. SST 모델에서 사용하는 난류운동에너지와 비소산률 $k-\omega$ 방정식은 다음과 같다[7].

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (4)$$

$$\nu_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, S F_2)}$$

F_2 는 벽 영향을 나타내는 조합함수이고 $P_{kb}, P_{\omega b}$ 는 부력효과, S 는 변형률(strain rate), a_1, α, β 는 상수이다.

수차의 최적설계를 얻기 위해 회전차의 주요변수(모양, 개수 등)을 변화시키며 수치해석을 수행하였다. Fig. 1은 냉각탑에서 순환하는 냉각수를 이용하여 관 내에 설치된 수차가 잉여수의 위치 에너지를 속도에너지로 변환 후 버킷을 회전시켜 전력을 생산하는 구성도이다. 경계 조건은 수차 입구에서 유속조건, 출구에서는 압력조건을 사용하였다. 건물 내의 냉각수 순환평균속도는 1.2 m/s 이고 빌딩의 높이는 30 m로 가정하였다.

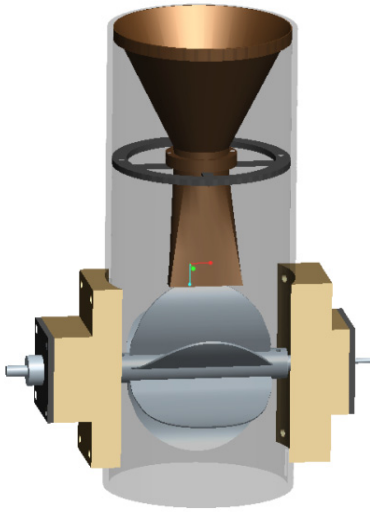


Fig. 1. Schematic diagram of Pelton turbine

Fig. 2와 Fig. 3은 고정된 영역인 노즐 부분과 회전 영역인 버킷의 격자구조를 나타낸다. 노즐 출구부분의 좁혀지는 구간과 수차 부분에서 구조적으로 복잡한 곳의 격자의 수를 조밀하게 형성하였다. 또한 벽면 효과를 위해서 벽면에 Inflation을 넣어서 벽면에서부터 점진적으로 격자구조가 커지도록 구성하였다. 또한 격자의 개수에 따른 해석 결과의 민감도 분석을 수행하였다. 노즐부분과 수차부분에서 격자수에 따른 수두와 토크값의 영향을 평가하여 적절한 격자수를 결정하였다. 격자 민감도 분석과 해석시간을 고려하여 최종 수치해석 모델은 관과 노즐의 경우 약 90만개, 그리고 수차 부분에서는 160만개의 격자수를 가진 모델로 구성하였다[8].

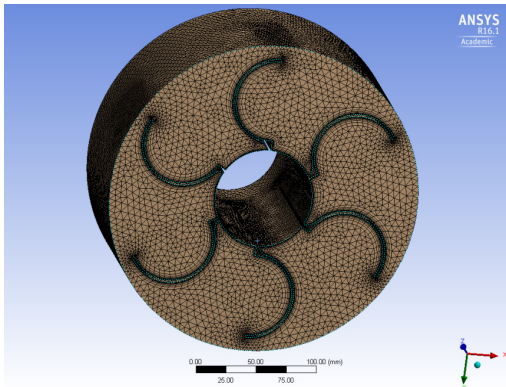


Fig. 2. Computational mesh of nozzle region

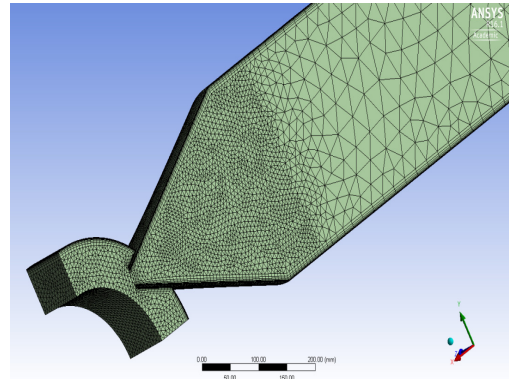


Fig. 3. Computational mesh of bucket wheel

3. 결과 및 고찰

3.1 벤치마킹 시험

본 연구에서 사용한 수치해석을 통한 설계방법의 검증을 위해 제작이 용이한 소형수차를 만들어 성능시험을 수행하였다. 제작상의 어려움으로 Fig. 4에 나타난 버킷의 형태로 편평한 모양과 끝의 각도를 구부리고 유동 순환을 위해 리브를 설치하여 좀 더 완만하게 만들어 실험을 수행하였고 같은 조건으로 수치해석을 수행하여 유동특성과 출력을 비교하였다.

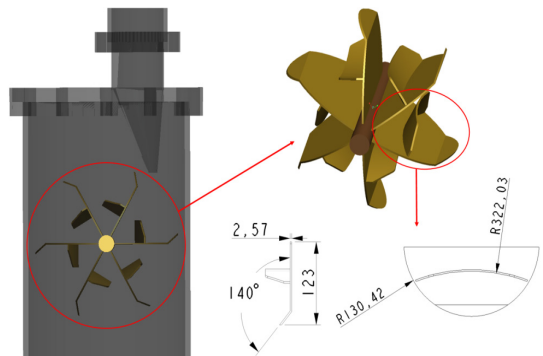


Fig. 4. Pelton turbine model for bench-marking test

Fig. 5는 실험장치 구성도로 유동특성을 측정하기 위해 초음파유량계와 압력 트랜스듀서를 사용하고 출력 측정을 위해 전압과 전류를 오실로스코프를 사용하였다 [9].

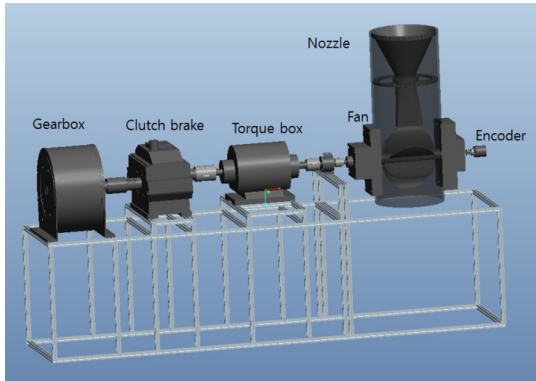


Fig. 5. Schematic diagram for experimental hydro power system

Table 1은 수치해석결과와 성능시험을 비교한 결과로 수치해석결과와 출력력이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이것은 수치해석에서 기계적 효율을 반영하지 못하기 때문이다. 수차효율은 수력효율, 체적효율과 기계적 효율의 곱으로 나타낼 수 있는데 기계적 효율을 85%로 가정하면 출력력에 대한 수치해석결과와 실험결과와의 차이가 3% 이내로 줄어든다. 따라서 수치해석 방법을 수차 설계에 사용하여도 타당한 것으로 판단된다. 또한 실험과 수치해석결과와의 차이는 수치해석에서 모든 유동 저항을 고려하지 못하고 실험에서 노즐에서 분사된 유량이 버킷으로 완전히 흡입되지 못한 것이 원인으로 판단된다.

Table 1. Comparison of present prediction with experimental data

	Experiment	Numerical Analysis
Rotation Speed (RPM)	608.6	608.6
Torque (N·m)	5.834	6.9996
Flux (kg/s)	9.4862	8.5842
Power (W)	371.8	445.6

Fig. 6과 7은 수차 내 버킷 주위의 속도벡터와 압력분포를 나타낸다. 버킷 주위의 유체 속도가 크고 분사된 제트가 충돌한 곳에서 압력이 증가하는 것을 알 수 있다.

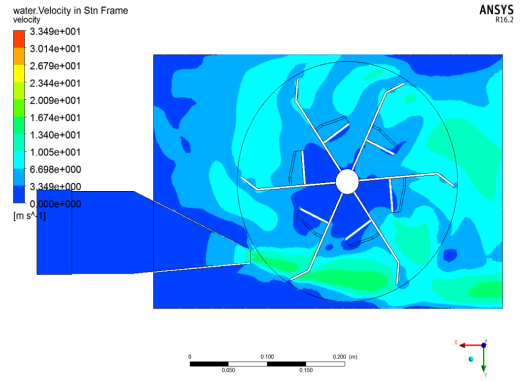


Fig. 6. Velocity vector around the bucket

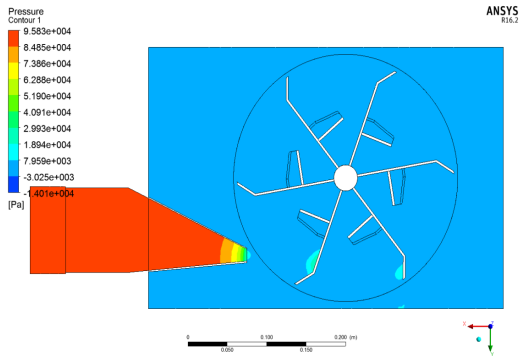


Fig. 7. Pressure distribution around the bucket

버킷에서 생성되는 시간에 따른 토크와 출력을 Fig. 8과 Fig. 9에 나타냈다. 각 버킷에서 시간에 따라 생성되는 토크와 펠톤 수차에 의해 생성되는 전체 출력(토크×회전수)을 알 수 있다.

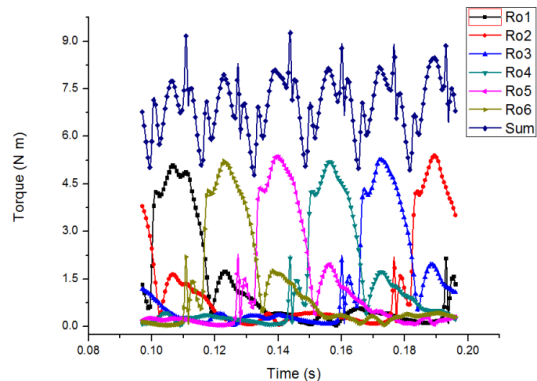


Fig. 8. Torque generated by buckets

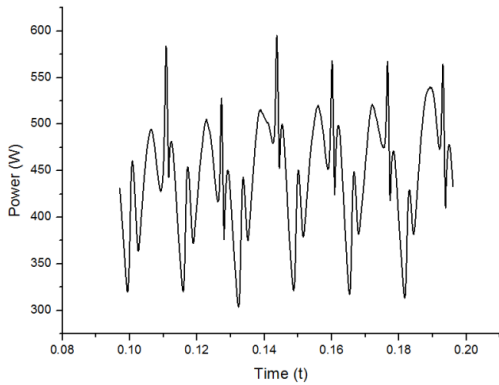


Fig. 9. Power generated by Pelton turbine

3.2 수차설계 및 유동특성

냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 순환되는 냉각수의 순평균속도는 1.2 m/s, 빌딩의 높이는 30 m인 경우에 수치해석을 수행하였다.

수치해석을 위해 Fig. 2와 Fig. 3과 같이 격자를 구성하였으며 노즐 출구부분의 좁혀지는 구간과 수차 부분에서 구조적으로 복잡한 곳의 격자의 수를 조밀하게 형성하였다. 펠톤 수차의 성능에 영향을 미치는 설계인자 중에 버킷 모양과 개수를 변화시키며 토크와 출력을 비교하였다. Fig. 10은 수치해석에서 사용된 노즐과 수차에서의 경계조건을 나타낸다.

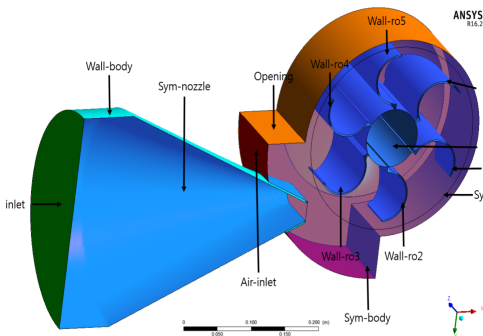


Fig. 10. Boundary conditions

Table 2는 버킷 모양에 따른 토크와 출력을 나타낸다. 노즐에서 분사되는 제트가 버킷에 충돌하면 그 방향이 바뀌어 유출하며, 방향 변화에 의하여 버킷에 힘이 발생하여 회전하는데 이 힘을 증가시키려면 이론적으로 방향 변화가 180도가 될 때 가장 크게 되므로 버킷 모양이 180도 round인 형태가 편평한 경우보다 큰 출력과 토크를 생산하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Comparison of flat bucket with round bucket

	Flat bucket	Round bucket
Torque (N-m)	81.2614	105.817
Power (kW)	9.003	11.723
Mass flow rate(kg/s)	91.5988	91.5988

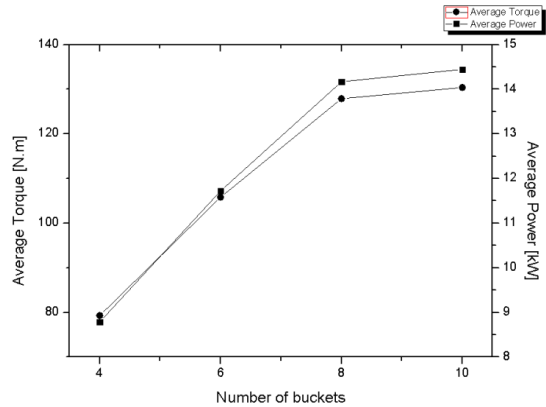


Fig. 11. Torque and power for various bucket number

Fig. 11은 버킷 개수에 따른 토크와 출력을 나타낸다. 버킷 개수가 증가하면 출력이 커지는 경향을 보이는 것을 알 수 있고 8개가 넘어가면 버킷이 서로 간섭을 일으켜 출력의 증가가 크지 않은 것을 알 수 있다. 실제 제작상의 어려움을 고려하여 버킷의 모양은 180° round 형태와 6개의 깃수를 갖는 수차에 대한 해석을 수행하였다.

버킷 주위의 속도분포를 Fig. 12에 나타냈다. 버킷에 고속의 유체를 충돌시켜 유체의 운동에너지를 기계적 에너지로 변환하게 된다. 유체가 분사되는 버킷을 따라 속도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

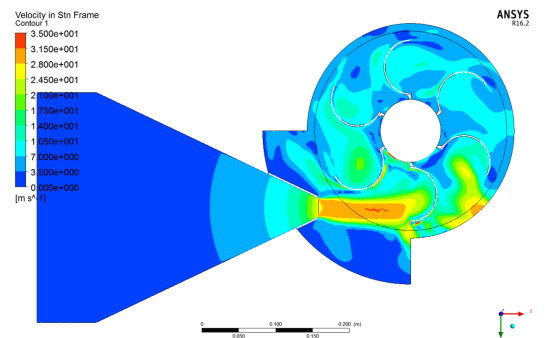


Fig. 12. Velocity vector around the bucket

제트의 충격에 의한 버킷에서의 압력분포는 Fig. 13과 같다. 최대 압력값은 제트가 직접 충돌하는 버킷 부근

에서 얻어진다. 이것은 제트가 충돌할 때 운동에너지가 압력으로 전환하는 것에 기인한다.

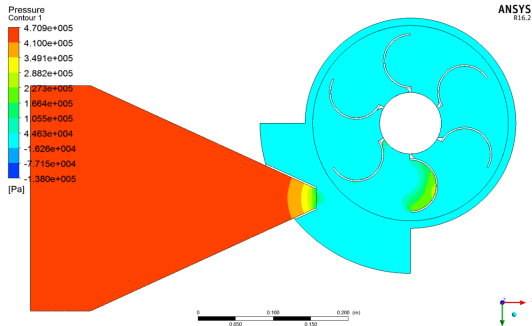


Fig. 13. Pressure distribution around the bucket

이론적으로 수차가 최대효율을 얻기 위해서는 버킷에 충돌하는 유체의 속도가 버킷의 회전속도의 2배인 경우가 된다. 따라서 노즐 출구에서 분사되는 유체의 속도를 고려하여 버킷의 회전수 1058 rpm, 유입유량 91.6 kg/s의 운전조건에 대해 수차의 성능특성을 해석하였다.

Fig. 14는 각 버킷에서 시간에 따라 발생하는 토크를 나타낸다. 또한 각 버킷에서 생성되는 토크량을 합한 수차에 의해 생성되는 전체 토크량도 보여준다.

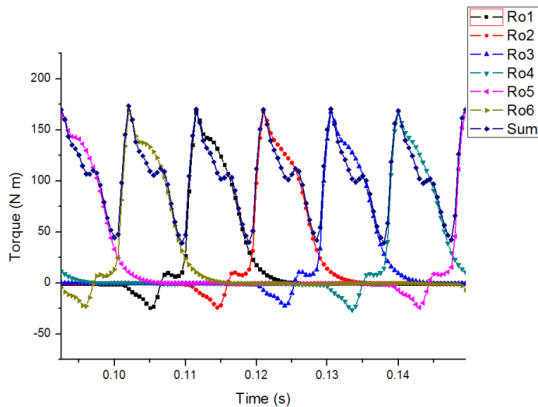


Fig. 14. Torque generated by buckets

Fig. 15는 시간에 따라 수차가 생산하는 출력(토크x 회전수)을 나타낸다. 회전수 1058 rpm, 유입유량 91.6 kg/s의 운전조건에서 시간에 대해 평균한 평균출력은 11.7 kW를 나타낸다.

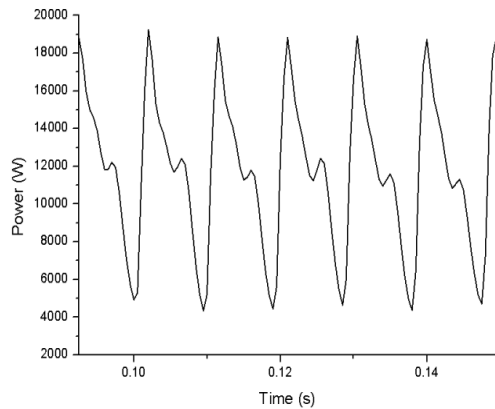


Fig. 15. Power generated by Pelton turbine

4. 결론

냉각탑이 설치된 대형빌딩에서 순환되는 냉각수를 이용하여 발전에 적합한 소규모의 수차 설계를 수행하였다. 건물 내의 냉각수 순환평균속도는 1.2 m/s이고 빌딩의 높이는 30 m인 경우에 대해 수차의 유동특성과 성능을 해석하고 kW급 수력 발전이 가능한 것을 확인하였다. 또한 실험과의 비교를 통해 수치해석 설계방법의 타당성을 확인하였고 주요 인자의 변화에 따른 펌프의 성능을 해석하여 다음의 결론을 도출하였다.

(1) 소형건물 내의 냉각수 순환평균속도는 1.2 m/s이고 빌딩의 높이는 30 m인 경우에 대해 수차의 유동특성과 성능을 해석하여 kW급 수력 발전이 가능한 것을 확인하였다. 회전수 1058 rpm, 유입유량 91.6 kg/s의 운전조건에서 평균출력은 11.7 kW를 나타낸다.

(2) 수차성능에 영향을 미치는 주요 인자 중에 버킷의 모양과 버킷의 개수에 따른 영향을 평가하여 원하는 출력을 얻기 위한 버킷의 모양과 개수를 구하였다.

(3) 수치 해석을 통한 설계 방법을 실험과 비교하여 수차설계에 사용할 수 있는 타당성을 확인하였다.

References

[1] S. L. Dixon, Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery, Butterworth Heinemann, 1998.
 [2] B. K. Kim, "Performance Characteristics of Micro Propeller Turbine," J. of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 3, pp. 25-32, 2014.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.3.025>

- [3] A. Sharma, P. Sharma and A. Kothari, " Numerical Simulation of Pressure Distribution in Pelton Turbine Nozzle for the Different Shapes of Spear, International Journal of Innovations in Engineering and Technology, Vol. 1, No. 4, 2012.
- [4] Y. D. Choi and S. W. Son, "CFD Analysis on the Performance and Internal Flow of a Micro Cross-Flow Hydro Turbine in the Range of Very Low Specific Speed," J. of Fluid Machinery, Vol. 15, No. 6, pp. 25-30, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.6.025>
- [5] Y. C. Hwang and Y. D. Choi, "Construction of Marine Small Hydro Power Plant using Discharge Water of Fish Farm," J. of Fluid Machinery, Vol. 16, No. 5, pp. 11-17, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2013.16.5.011>
- [6] S. E. Park and H. W. Roh, "The Study on Design of the 5kW Class Inline Micro-Turbine," J. of Fluid Machinery, Vol. 15, pp. 32-38, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5293/kfma.2012.15.3.032>
- [7] A. Panthee, H. P. Neopane and B. Thapa, "CFD Analysis of Pelton Runner," International Journal of Scientific and Research Publications, Vol. 4, No. 8, pp. 1-6, 2014.
- [8] S. Pudasaini, H. P. Neopane, A. Panthee, A. Pathak and B. B. Chaudhary, "Computational Fluid Dynamics analysis of Pelton runner of Khimti Hydro-Power Project of Nepal", Rentech Symposium Compendium, 4, pp. 91-94, 2014.
- [9] A. Perrig, F. Avellan, J. L. Kueny, M. Farhat, E. Parkinson, " Flow in Pelton Turbine Bucket: Numerical and Experimental Investigations," Journal of fluids engineering, Transactions of the ASME, Vol. 128, No. 2, pp. 350-357, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1115/1.2170120>

이 계 복(Kye-Bock Lee)

[정회원]



- 1981년 2월 : 서울대학교 기계공학과 (공학사)
- 1983년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학석사)
- 1987년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학박사)
- 1996년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

난류유동, 유체기계, 전산유체

정 선 응(Kye-Bock Lee)

[준회원]



- 2015년 2월 : 충북대학교 기계공학부 (공학사)
- 2015년 8월 ~ 현재 : 충북대학교 기계공학과 대학원 석사과정

<관심분야>

유체기계, 전산유체