

## 삼투압발전용 마이크로 펠턴터빈의 성능해석

오형우\*\*

### Performance Analysis of a Micro-Hydro Pelton Turbine for the Osmotic Power Generation

Hyoung Woo Oh\*\*

Key Words : Osmotic Power Generation(삼투압발전), Pelton Turbine(펠턴터빈), CFD(전산유동해석), Performance Analysis(성능해석)

#### ABSTRACT

This paper presents the transient performance analysis of a micro-hydro Pelton turbine for the osmotic power generation using the commercially available computational fluid dynamics (CFD) code, ANSYS CFX. The detailed flow field in the micro Pelton turbine with a single-jet is investigated by the CFD code adopted in the present study. Predicted characteristic curves agree fairly well with measured data for a prototype Pelton turbine over the normal operating conditions. The computational analysis method presented herein can be effectively applied to the hydraulic design optimization process of general purpose Pelton turbine runners.

#### 1. 서론

최근 친환경 에너지원의 활용방안으로 수력발전에 대한 관심이 높아지면서 고낙차 혹은 고유량의 수자원을 이용하는 수력발전 시스템뿐만 아니라, 발전설비 구축비용이 비교적 저렴하고 지역단위 소규모 발전이 가능한 ‘소수력발전’과 ‘삼투압발전(osmotic power generation)’에 대한 연구가 주목 받고 있다. 전통적인 수력발전방식과 달리 삼투압발전의 경우, 서로 다른 염도구배(salt gradient)를 갖는 담수(fresh water)와 염수(brine)가 분리막(membrane)을 사이에 두고 있을 때, 삼투현상(osmosis)으로 인해 염수측 압력양정(~120 m 정도의 터빈유효양정에 해당하는 전압)이 상승하게 되고 이것을 터빈러너(turbine runner)의 기계적 에너지로 변환한다.

이러한 삼투압발전 시스템에 적합한 터빈형식은 무차원 비속도 영역(0.03~0.4)을 고려할 때, 저유량·중낙차 조건에서 효율이 높은 ‘충동형 펠턴터빈(Pelton turbine)’으로 결정된다. 펠턴터빈은 노즐(nozzle)에서 분출되는 고속의 워터제트(water jet)를 러너버킷(runner bucket)에 충돌시켜 얻게 되는 기계적 에너지(터빈러너의 각운동량 변화에 기인)를 이용

하는 비교적 간단한 작동원리를 가지고 있다. 그러나 케이싱 내부에 단상(single-phase)의 작동유체가 충만한 상태로 운전되는 대부분의 유체기계와는 달리 펠턴터빈의 경우, 노즐에서 분출된 워터제트(물)가 케이싱 내부에서 공기와 자유표면(free-surface)을 형성하고 러너 일부의 버킷에 충돌한다. 그러므로 펠턴터빈의 성능특성을 파악하기 위해서는 비정상 다상유동해석(transient multiphase flow analysis)이 반드시 필요하다. 이와 같은 펠턴터빈 내부의 복잡한 유동특성으로 인해 오랜 역사를 가지고 있는 터빈형식임에도 불구하고 상세 내부유동해석이 가능해진 최근에 이르러서야 관련된 연구논문(1-3)들이 발표되기 시작했다. 한편, 국내의 경우 공개문헌상에 보고된 펠턴터빈에 대한 연구사례는 본 학회에서 주관한 ‘유체기계 핵심기술강습회’ 발표자료(4)가 유일하다.

이러한 상황에서 2009년 지식경제부 주관 다년도 연구과제(‘Eco-Ener 플랜트 경쟁력 확보사업’)의 세부사업으로서 삼투압발전 시스템 구축 관련 연구가 시작되었다. 이를 통해 국내에서도 삼투압발전 분야에 대한 기초연구와 발전설비 요소기술로서 펠턴터빈에 대한 체계적인 연구가 시작되었다. 현재 삼투압발전 시스템에 대한 해외 선진기술사례(5)를 살펴 보더라도 아직 상용화 단계가 아닌 파일럿 플랜트(Fig. 1) 규모의 연구가 진행되고 있는 상황이기 때문에 국내 독자 설계·해석기술의 확보는 중요한 의미를 갖는다.

\* 충주대학교 기계공학과

† 교신저자, E-mail : hw\_oh@cjnu.ac.kr

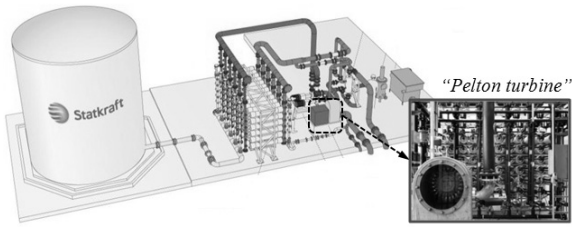


Fig. 1 Overview of an osmotic power prototype<sup>(5)</sup>

본 논문에서는 그동안 연구수행과정에서 도출된 마이크로급(100 kW급 미만의 터빈) 펠턴터빈(micro-hydro Pelton turbine)에 대한 비정상 CFD 해석방법을 제시하고 이에 대한 예측성능 신뢰도를 검증하고자 한다. 본 연구를 통해 신뢰성이 확보된 성능해석방법은 향후 펠턴터빈의 효율향상을 위한 상세설계과정에 활용될 예정이다.

## 2. 유동해석방법

현재 기본설계를 통해 도출된 삼투압발전용 마이크로 펠턴터빈(러너평균지름 237 mm)에 대한 축소모델(러너평균지름 92 mm)을 선정<sup>(6)</sup>하고 이에 대한 CFD 성능해석을 수행하고자 한다. Fig. 2는 모델터빈원형(prototype)과 전산해석을 위해 모델링한 터빈러너의 3차원 형상을 나타낸다.

삼투압발전용 마이크로 펠턴터빈의 경우, 작동유량범위를 고려할 때, 대부분 1개의 노즐(a single-jet Pelton turbine)이 장착된다. 이에 따라 워터제트와 러너버킷 사이에 발생하는 비대칭 유동구조를 파악하기 위해서는 러너버킷 전체(모델터빈의 경우, 16개의 러너버킷)를 고려한 해석이 필요하다. 한편, 펠턴터빈의 케이싱은 터빈의 수력성능에 영향을 주지 않기 때문에 해석영역에서 배제할 수 있다. 그리고 수치해석의 효율성을 고려하여 유동의 대칭면 조건(symmetry condition for simulating half of the runner)을 적용하기로 한다. Fig. 3은 상기의 조건을 고려한 계산영역을 나타낸다.

수치해석을 위한 계산격자는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 비정렬 격자계<sup>(7)</sup>로 구성하였다. 본 논문에서는 터빈러너에 작용하는 토크(torque)에 대한 수치해를 비교함으로써, 격자수에 따른 격자의존도검사(grid dependency test)를 수행하였다. 즉, 격자수 2,461,603; 3,459,322; 3,973,493; 4,112,166 노드(node)에 따른 러너토크를 비교한 결과, 3,973,493 노드 이상에서 일정수준의 토크를 예측하였다. 이것을 바탕으로 3,973,493 노드(사면체 4,580,924; 프리즘 5,868,620; 피라미드 1,240 요소)로 구성된 격자계를 CFD 성능해석에 사용하기로 한다. 한편, 벽면 근처의 급격한 속도구배에 대한 수치해의 정확성을 높이기 위해 벽면에서 1번째 격자점까지의 무차원 거리( $y^+$ )가 1 이하가 되도록 벽면에 프리즘 격자를 삽입하였다.

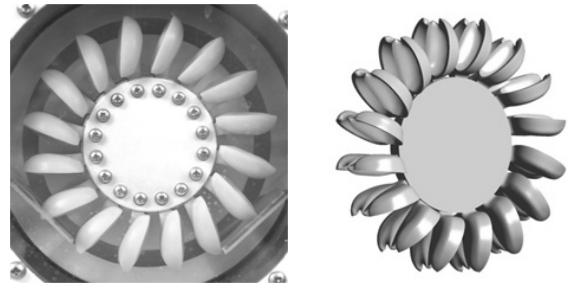


Fig. 2 A model Pelton turbine: photograph of the model turbine (left) and three-dimensional modeling (right)

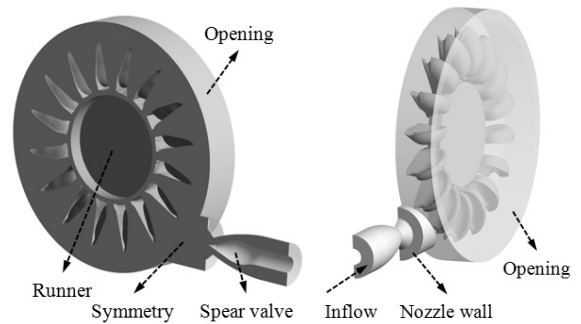


Fig. 3 Computational domains with boundary conditions

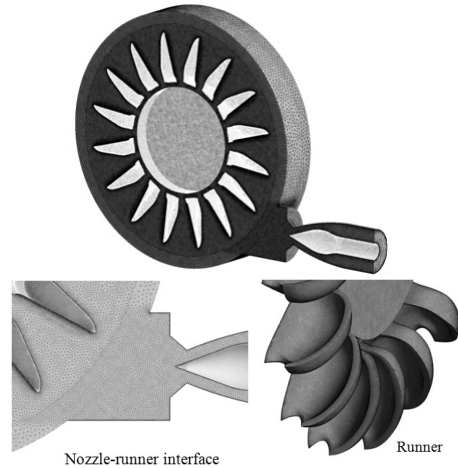


Fig. 4 View of computational mesh

본 논문에서는 상용 CFD코드<sup>(8)</sup>를 도입하여 펠턴터빈 내부의 3차원 비정상 난류유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 펠턴터빈 내의 유동은 2상유체(물·공기)가 동일한 속도장(velocity field)을 공유하고, 자유표면에 의해 서로 분리되어 있다(two-phase homogeneous model with free-surface)고 가정한다. 그리고 2상유체 사이의 밀도차이에 기인한 부력(buoyancy)을 고려하기 위해 중력을 포함시킨다. 난류모델의 경우, 유동박리현상 해석에 적합한 전단응력이송(shear stress transport, SST)모델을 사용하였다.

수치해석을 위한 경계조건(Fig. 3)으로는 노즐입구에 질량유량을 지정하고 고정좌표계의 유체영역에 해당하는 출구

의 경우, 유체유입을 고려한 ‘Opening’ 압력조건(대기압)을 적용한다. 그밖에 유동의 대칭면 조건을 고려하고, 벽면에 해당하는 밸브(spear valve), 노즐 부위 및 러너에 접촉조건(no-slip condition)을 적용한다. 고정좌표계의 유체영역과 회전좌표계의 러너영역 사이의 경계면은 ‘Transient Rotor Stator’로 처리한다.

비정상해석에 대한 수치해의 수렴성을 향상시키기 위해 적절한 초기조건설정이 중요한데, 먼저 정상상태 조건하에서 연속방정식을 만족시키는 수준까지 수치해석을 충분히 수행하고 그 결과물을 비정상해석의 초기값으로 활용한다. 한편, 비정상해석을 수행하는데 필요한 시간간격(time step size for transient analysis)은 각 계산단계별 펠턴러너의 주기적 토크특성과 Courant 수(2~10 범위 내의 값을 권장<sup>(8)</sup>)를 검토하여 결정한다. 비정상해석의 특성상, 수치해의 수렴성 여부는 이산화방정식에 대한 상대잔차량(residual)만으로는 결정될 수 없고, 각 계산영역에서 수치해의 imbalance 검토, 질량유량의 보존성 그리고 펠턴러너의 토크에 대한 주기적 특성이 나타나는 시점 등을 확인하여 결정한다.

### 3. 펠턴터빈의 수력성능해석

본 논문에서 제시하는 성능해석방법의 타당성을 검증하기 위해 모델터빈의 수력성능시험결과<sup>(6)</sup>와 예측성능을 비교하고자 한다. 이를 수행하기 위해 모델터빈에 대한 성능시험결과 중, 유량이 최대로 발생하는 노즐 위치에 대해서 러너회전수의 변화에 따른 펠턴터빈의 수력성능특성을 검토한다.

펠턴터빈의 수력성능특성을 효과적으로 도시(Fig. 5)하기 위해 다음과 같은 무차원수를 도입하기로 한다.

$$\begin{aligned} \chi &= U / V_j & (1) \\ \tau &= T / T_{max} & (2) \\ \psi &= \dot{W} / \dot{W}_{max} & (3) \\ \eta &= 2\dot{W} / (\rho Q V_j^2) & (4) \end{aligned}$$

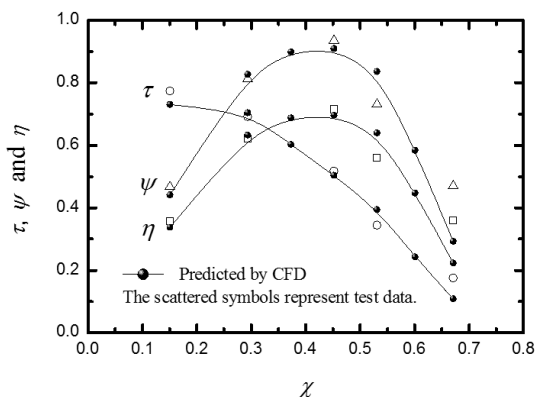


Fig. 5 Performance characteristics for a model Pelton turbine

여기서  $U$ 와  $V_j$ 는 각각 러너평균지름에 대한 회전속도와 워터제트속도를 의미하고,  $T$ 와  $\dot{W}$ 는 러너토크, 터빈출력량을 나타낸다. 그리고 작동유체의 밀도와 부피유량은 각각  $\rho$ 와  $Q$ 로 나타낸다. 아래첨자  $max$ 는 러너회전속도의 변화에 따라 러너토크가 선형적으로 분포한다는 이상적인 펠턴터빈의 성능특성으로부터 도출한 최대성능으로서, 최대러너토크는 러너가 회전하지 않는 경우에 발생하고 최대터빈출력은  $U = V_j/2$ 인 조건에서 얻을 수 있다. 한편,  $V_j$ 의 경우 워터제트가 국부적으로 가속되는 지점(vena contracta)에서 유동해석을 통해 도출하였다. Fig. 5의 성능특성곡선을 살펴보면, 본 논문에서 제시한 CFD 성능해석방법에 의해 예측된 성능곡선은 효율( $\eta$ )이 급격히 감소하는 고(저)속의 러너회전속도 영역을 제외한 대부분의 운전범위에서 모델터빈의 시험결과를 정성적·정량적으로 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다.

참고로 최고효율(혹은 최대출력량) 지점과 펠턴러너의 최적 회전속도 사이의 관계를 살펴보면, 기본설계단계(평균유선해석법에 기반을 둔)에서 예측되는 이론적 최대 터빈출력은 속도비(speed ratio,  $\chi$ ) ‘0.5’ 조건에서 결정된다. 그러나 실제 설치조건을 고려한 설계의 경우, 터빈러너에 작용하는 유체역학적, 기타 기계적 외부손실 등으로 인해 최적의 속도비는 ‘0.42~0.48’ 범위 내에서 결정된다. 본 연구에서 도입한 모델터빈의 경우, Fig. 5의 결과를 살펴보면 ‘0.45’의 속도비를 기준으로 설계(즉, 최적의 속도비 0.45에서 최고효율 71.5% 발생)된 것임을 알 수 있다.

한편, 본 논문에서는 펠턴터빈의 성능특성곡선에 대한 분석과 더불어 러너버킷과 워터제트 사이의 유체역학적 상호작용에 대해서 고찰하고자 한다. Fig. 6은 속도비 ‘0.45’에 해당하는 러너회전수에 대한 전산해석결과로서, 시간간격에 따라 터빈러너가 회전( $\phi = \theta/s$ )할 때 각각의 러너버킷에 작용하는 토크분포를 보여주고 있다.  $\theta$ 는 터빈러너의 회전각도(angular position),  $s$ 는 피치(angular pitch angle)를 의미한다. 그림에서 ‘점선’은 각각의 러너버킷에 작용하는 토크분포, ‘실선’은 러너 전체에 대한 토크분포를 나타낸다. 러너버킷의 회전위치에 따른 내부유동특성을 고찰하기 위해 ‘III’로 표기된 버킷을 선택하고 회전위치((a)~(h)지점)를 러너버킷 ‘III’와 러너 전체의 토크분포에 각각 표기하였다. 워터제트에 의한 러너버킷 ‘III’의 표면압력분포를 참조하면, 토크가 최대로 발생하는 (f)지점에서 워터제트가 버킷 앞면의 러너평균지름 위치에 집중되어 있음을 확인할 수 있다. 반면에 (d), (e)지점의 경우, 버킷 앞면에 충돌하는 워터제트가 분산되어 있고 러너버킷 ‘II’에서 유출된 작동유체가 버킷 ‘III’의 뒷면에 영향을 주고 있음을 확인할 수 있다. 이러한 현상 때문에 러너버킷의 출력토크가 감소하게 된다. 한편, (b)지점과 비교할 때 러너버킷의 토크가 (c)지점에서 일시적

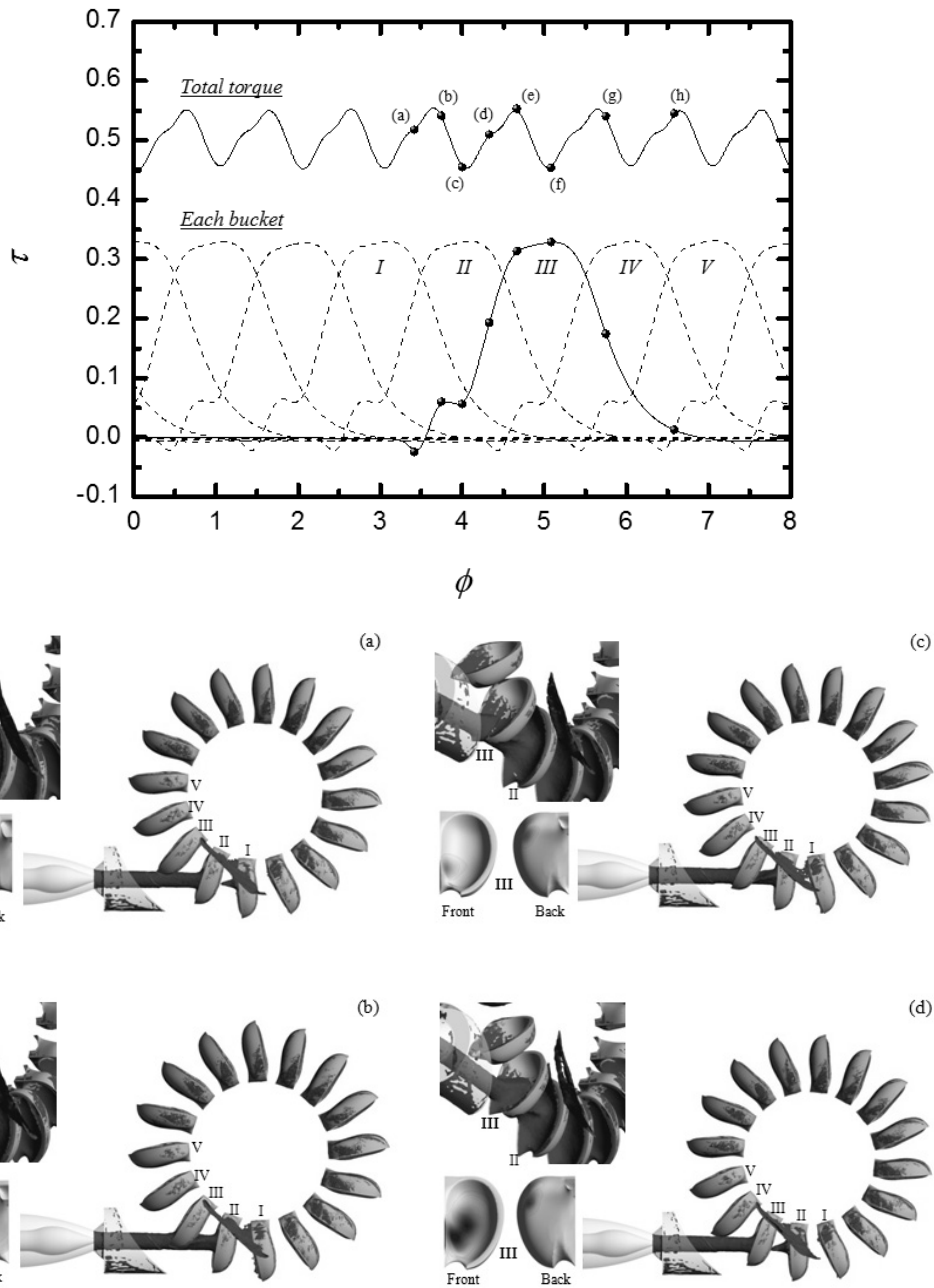


Fig. 6 Runner torque variations versus angular position

으로 감소하는 현상은 버킷 뒷면에 충돌하는 유동에 기인한다. 나머지 지점에서는 이미 유입된 워터제트가 러너버킷에 잔류한 상태에서 작동유체의 일부가 유출됨에 따라 출력토크가 감소하게 된다. 러너 전체에 작용하는 토크분포를 살펴보면, (e)지점과 (f)지점에서 각각 최대, 최소의 터빈출력이 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 최적의 펠턴터빈러너를 설계하기 위해서는 워터제트의 유·출입속도를 고려한 러너버킷의 최적유로 및 워터제트와의 간섭을 고려한 버킷의 설치각도 그리고 버킷수 등을 설계변수로 설정해야 한다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 삼투압발전용 마이크로급 펠턴터빈의 성능특성을 분석하기 위해 노즐을 포함한 고정영역과 러너 전체를 포함한 회전영역을 고려한 비정상 전산해석방법을 제시하였다. 모델터빈의 수력성능시험결과와 2상 균질 유동모델에 근거한 예측성능결과를 비교함으로써 본 연구에서 제시한 성능해석방법의 타당성을 검증하였다. 한편, 워터제트와 러너버킷 사이의 유체역학적 상호작용에 대한 검토와 러너의 토크특성에 대한 분석 등을 통해 펠턴터빈의 비정상 유동



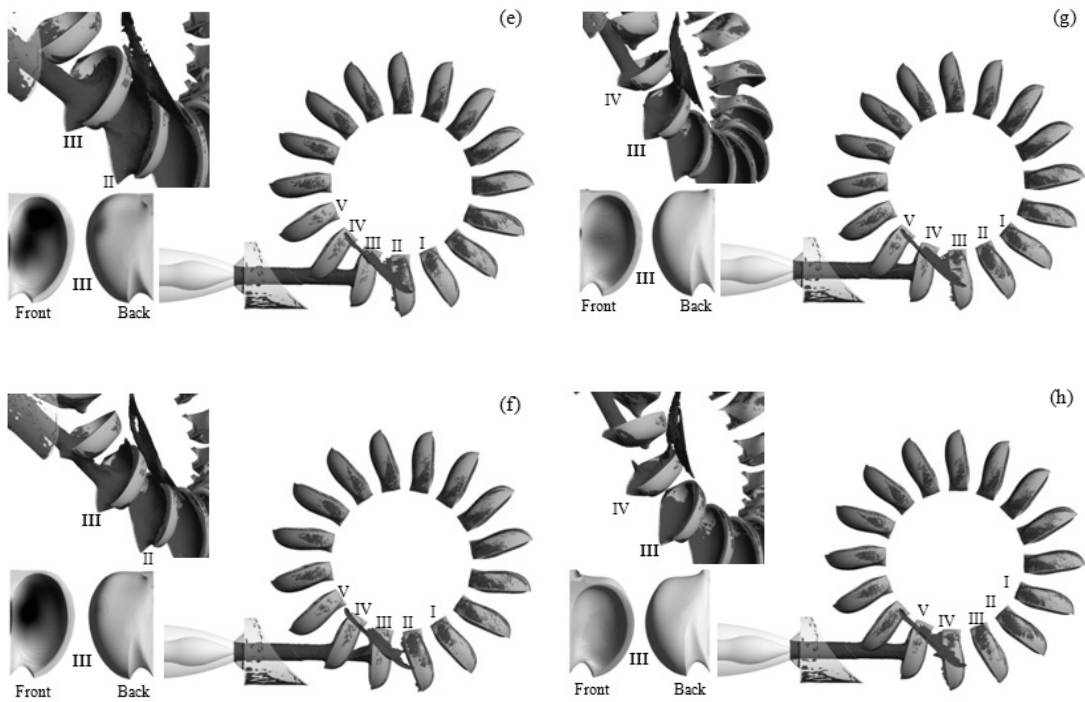


Fig. 6 Runner torque variations versus angular position (continued)

특성을 도출할 수 있었고 그 결과, 최적설계단계에서 고려되어야 할 대표적인 설계변수들을 제안하였다.

본 연구를 통해 도출된 성능해석방법은 향후 삼투압발전용 마이크로 펄턴터빈의 효율향상을 위한 상세설계과정 뿐만 아니라, 고낙차의 전통적인 수력발전용 펄턴터빈의 최적설계에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

## 후 기

이 논문은 2011년도 충주대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

## 참고문헌

(1) Perrig, A., Avellan, F., Kueny, J.-L., Farhat, M., and Parkinson, E., 2006, "Flow in a Pelton Turbine Bucket:

Numerical and Experimental Investigations," *Trans. ASME J. Fluids Engineering*, Vol. 128, pp. 350~358.

(2) Zoppe, B., Pellone, C., Maitre, T., and Leroy, P., 2006, "Flow Analysis Inside a Pelton Turbine Bucket," *Trans. ASME J. Turbomachinery*, Vol. 128, pp. 500~511.

(3) Santolin, A., Cavazzini, G., Ardizzon, G., and Pavesi, G., 2009, "Numerical Investigation of the Interaction Between Jet and Bucket in a Pelton Turbine," *IMEchE J. Power and Energy*, Vol. 223, pp. 721~728.

(4) 오형우, 이상훈, 박노현, 유진승, 2010, "마이크로펠턴터빈의 버킷에 관한 설계," 제4회 유체기계 핵심기술강습회, pp. 45~54.

(5) <http://www.statkraft.com>

(6) TQ H19 Pelton Wheel, TecEquipment Ltd.

(7) ANSYS ICEM CFD 12.1, 2009.

(8) ANSYS CFX 12.1, 2009.