

Original Article

## 파력발전용 임펄스 터빈 성능 예측을 위한 실용적인 방법

박선호<sup>1</sup> · 전우영<sup>2</sup> · 김길원<sup>3</sup> · 현범수<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>한국해양대학교 해양공학과 교수

<sup>2</sup>한국해양대학교 해양공학과 대학원생

<sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 해양플랜트·에너지연구본부 시험연구원

<sup>4</sup>한국해양대학교 조선해양시스템공학부 교수

# Practical Method for Performance Prediction of Impulse Turbine for OWC-type Wave Energy Converter

Sunho Park<sup>1</sup>, Wooyoung Jeon<sup>2</sup>, Kilwon Kim<sup>3</sup>, and Beom-Soo Hyun<sup>4,†</sup>

<sup>1</sup>Professor, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

<sup>2</sup>Graduate Student, Department of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

<sup>3</sup>Junior Researcher, Offshore Plant and Marine Energy Research Division, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon 34103, Korea

<sup>4</sup>Professor, Division of Naval Architecture and Ocean Systems Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

### 요 약

진동수주형 파력발전장치에 유입되는 불규칙 해양파를 고려한 임펄스 터빈의 성능 추정을 위한 실험적, 수치적 방법 모두 많은 시간을 필요로 한다. 본 논문에서는 불규칙 해양파를 고려한 임펄스 터빈 성능 추정을 위한 실용적인 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 정상상태 유입류에 대한 터빈의 성능 데이터를 이용하여 불규칙파를 고려한 비정상상태 유입류에 대한 터빈의 성능을 예측하는 방법을 이용하였다. 정상상태 유입류에 대한 터빈의 성능은 전산유체역학을 이용하여 다양한 유량 및 회전속도에서의 결과를 포함한다. 비정상상태 유입류에 대한 터빈의 성능은 정상상태 유입류에서의 성능 결과를 이용하여 뉴턴의 운동방정식을 통해 얻을 수 있다. 예측한 비정상상태 유입류에 대한 터빈 성능은 실험 결과와 유사한 결과를 나타내었다. 수치안정성을 위한 방법이 적용되었고 정지모드를 포함하였다. 다양한 유입속도의 크기, 토크 손실, 관성모멘트의 영향에 따른 성능을 예측하였다.

**Abstract** – A performance prediction with irregular waves of an impulse turbine in oscillating water column (OWC) requires a lot of time in experimental and computational methods. This study proposed a practical method to predict an impulse turbine performance with an unsteady inflow conditions. The proposed method predicts the performance with unsteady inflows using performance data with steady inflows, which obtained by computation fluid dynamics (CFD) analysis for various rpms and inflow conditions. The performance with unsteady inflows was obtained by solving the Newton’s 2nd law of motion equation using the performance data with steady inflows. The numerical stability method was considered and stopping mode also added to the method. The predicted revolution speed was compared with the experimental data. The effect of an inflow amplitude, a torque loss and a moment of inertia was studied.

**Keywords:** Impulse turbine(임펄스 터빈), Oscillating water column(진동수주), Practical method(실용적 방법), Unsteady performance(비정상상태 성능), Wave energy converter(파력 변환)

### 1. 서 론

진동수주형 파력발전장치는 해양파의 운동에너지를 기계에너지로의 안정적인 변환과 유지보수의 용이성, 긴 설계수명으로 타 파

력발전에 비해 상용화에 근접한 장치이고 많은 연구들이 진행되었다(Setoguchi *et al.*[1996]; Setoguchi *et al.*[2001]; Hong *et al.*[2016]; Hong *et al.*[2017]).

초기의 파력발전용 임펄스 터빈(Impulse turbine)에 대한 연구는 주로 균일류(Uniform flow)에 대한 정상상태 연구가 주로 진행되

†Corresponding author: bshyun@kmou.ac.kr

었다. Setoguchi *et al.*[1996];[2001]는 가변 피치형 가이드 베인(Guide vane)을 적용하여 임펠스터빈의 성능을 실험적으로 평가하였다. Hyun *et al.*[2004]은 임펠스 터빈 날개 1개에 대한 전산유체역학 해석을 통해 가이드 베인(Guide vane)의 터빈 성능에의 영향을 검토하였다. Liu *et al.*[2017]은 정상상태에서 140 케이스에 대한 모형시험을 통해 최대 성능을 나타내는 유량계수와 이때의 성능을 도출하였다. Cui and Hyun[2016]은 다양한 웰스터빈(Wells turbine) 성능에 대해 전산유체역학 해석을 하여 링 타입(Ring-type) 웰스터빈이 가장 우수한 결과를 얻었다. Cui *et al.*[2017]은 전산유체역학을 이용하여 링 타입(Ring-type) 터빈과 날개 끝에 플레이트(Plate)가 붙여진 터빈의 성능을 비교하였다. Yang *et al.*[2017]은 전산유체역학을 이용하여 뒤젓힘각(Sweep angle)에 대한 연구를 통해 최적의 뒤젓힘각을 제안하였다.

해양의 불규칙파를 고려한 비정상상태 유입류(Incoming flow) 및 정지 상태에서 초기 작동에 대한 연구도 최근에 진행되고 있다. Liu *et al.*[2018]은 3차원 비정상상태 전산유체역학 계산을 위한 전산모델을 제시하였다. Badhursha *et al.*[2018]은 혼합 유전 알고리즘을 적용하여 임펠스 터빈의 최적 설계를 진행하였다. Cui *et al.*[2019]는 실험을 통해 정지 상태에서 작동 시 토크를 계속하였다. Lopes *et al.*[2019]는 실험을 통해 최신의 트윈 로터(Twin rotor)의 효율, 동력, 압력손실, 유량을 제시하였다.

불규칙파를 고려한 비정상상태 유입류에 대한 임펠스 터빈의 해석은 실험적 성능 예측을 위해서는 필요한 방법이지만 시간이 많이 소요되는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 비정상상태 유입류를 고려한 임펠스 터빈의 성능을 빠르고 정확도 높게 예측할 수 있는 실용적인 방법을 제안하였다. 제안한 실용적인 방법은 C++ 프로그램 언어를 이용하여 구현하였다.

## 2. 제안한 방법

Fig. 1은 제안한 방법의 흐름도(Flow chart)를 보여주고 있다. 계산에 앞서 여러 가지 입력 정보를 필요로 한다. 입력정보에는 터빈의 기하학적 제원, 균일류에서의 터빈성능 데이터, 초기조건, 경계조건, 계산 간격, 계산 시간이다. 기하학적 제원에는 로터(Rotor)를 감싸는 내부 및 외부 덕트(Duct) 직경, 허브비(Hub ratio), 로터 날개수, 로터 코드 길이(Chord length), 관성모멘트가 포함된다. 균일류에서의 터빈성능 데이터는 전산유체역학을 이용하여 얻어진다(Yang *et al.*[2017]). 터빈 성능 해석은 1개의 날개에 대해서 이루어졌다. 실험과의 비교를 통해 격자 및 경계조건을 선정하였고 선정된 방법을 이용하여 다양한 균일류에 대한 계산이 이루어졌다. 균일류에서의 터빈성능으로는 다양한 유량에 따른 입력계수(Input coefficient,  $C_A$ ), 토크계수(Torque coefficient,  $C_T$ ), 터빈효율(Turbine efficiency,  $\eta$ )로 구성하였다. 입력계수, 토크계수, 터빈 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$C_A = \frac{2\Delta p Q}{\rho_a(V_a^2 + U_R^2)bl_z V_a} \quad (1)$$

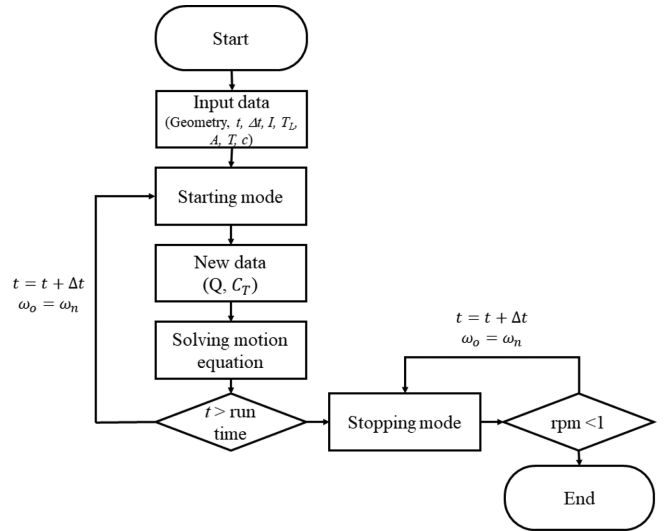


Fig. 1. Flow chart for proposed practical method.

$$C_T = \frac{2T}{\rho_a(V_a^2 + U_R^2)bl_z r_R} \quad (2)$$

$$\eta = \frac{T\omega}{\Delta p Q} \quad (3)$$

여기서  $\Delta p$ ,  $Q$ ,  $T$ ,  $\rho_a$ 는 각각 압력강하, 유량, 토크, 공기밀도를 나타내며,  $V_a$ ,  $U_R$ ,  $b$ ,  $l_z$ ,  $r_R$ ,  $\omega$ 는 각각 축 방향 평균유속,  $r = r_R$ 에서의 회전방향유속, 날개 스팬길이, 날개 코드길이, 날개수, 날개의 평균반경(여기서는  $0.85R$ ), 각속도를 의미한다. 초기조건과 경계조건에는 정지 상태에서의 회전속도(0 rpm)와 회전각, 유입류의 속도 분포(Velocity profile), 토크 손실(Torque loss,  $T_L$ )이 정의된다. 토크 손실은 기계적 손실(Mechanical loss,  $T_F$ )과 발전기의 반력토크 손실(Reacting torque loss,  $T_R$ )로 구성된다. 계산 간격은 0.001초가 사용되었고 계산시간은 200초이다. 계산간격이 작을수록 수렴이 빨리되는 경향을 보였으며 시험과 비교하여 수렴되는 시간이 같도록 계산 간격을 0.001초로 선정하였다.

입력정보를 읽은 후에는 유입류에 따른 성능예측 모듈이 시작된다. 경계조건으로 주어진 속도 분포를 이용하여 현재의 시간에 따른 속도를 계산하고 유량으로 변환한다. 정상상태 유입류에서 계산한 터빈의 성능 결과를 바탕으로 현재의 유량에 따른 토크 계수를 선형보간한다. 유량에 따른 토크 계수의 범위는 Table 1과 같다.

유량이 입력 자료의 유량 범위를 벗어나는 경우 선형 외삽하도록 프로그램을 작성하였다. 내삽과 외삽에는 2차 곡선을 이용한 방

Table 1. Torque ranges for various flow rates

Flow rate (m <sup>3</sup> /s)	rpm	Torque coefficient ( $C_T$ )
1	200	0.01138
2	200 ~ 800	0.01763 ~ 0.05153
3	200 ~ 1200	0.59299 ~ 0.03933
6	200 ~ 1200	0.65925 ~ 0.33815
9	200 ~ 1200	0.68173 ~ 0.46741
12	200 ~ 1200	0.69283 ~ 0.53250

법도 고려하였지만 최종적으로 1차 곡선을 선정하였다. 현재시간에서 유량에 따른 토크계수를 이용하여 뉴턴의 2차 운동방정식을 계산한다. 뉴턴의 2차 운동방정식은 다음과 같이 나타낸다.

$$I \frac{d\omega}{dt} + T_L = T_D \quad (4)$$

여기서  $I$ 는 관성모멘트를 나타내고  $\omega$ 는 회전각속도,  $T_D$ 는 유입류에 의해 로터에 발생하는 토크를 나타낸다.  $T_D$ 는 보간한 토크계수로부터 구해진다. 뉴턴의 운동방정식을 이산화하면 다음과 같이 나타낸다.

$$\omega_n = \omega_o + (T_D - T_L)\Delta t / I \quad (5)$$

여기서  $\omega_n$ 과  $\omega_o$ 는 각각 현재와 과거에서의 회전각속도를 나타낸다. 위 식에서  $\omega_o$ 는 전 시간에서 구한 값이거나 초기 값이고  $T_D$ 은 현재 속도에서 계산한 토크이고,  $T_L$ 와  $I$ 는 입력 자료로 모두 알고 있는 값이다. 따라서 위 식을 이용하여 현재의 각속도  $\omega_n$ 을 계산할 수 있다.

정지 상태에서 터빈이 작동하게 되면 현재의 회전각속도는 0에서부터 증가하기 시작하며 유체력에 의한 토크도 0에서부터 차츰 증가하기 시작한다. 토크손실( $T_L$ )이 큰 값을 입력정보로 주게 되면  $T_D - T_L$ 이 마이너스의 값을 가질 수 있다. 이를 방지하기 위해 토크손실( $T_L$ )을 점진적으로 증가시켜서 일정시간 후에 입력한 값에 도달하는 방법을 사용하였다. 여기서 일정시간은 수치적인 안정성을 위해 도입한 시간으로 시행착오를 거쳐 20초로 선정하였다.

터빈의 성능 계산은 입력 자료로 입력한 계산 시간 동안 지속된다. 계산 시간이 종료되면 정지 구간(Stopping mode)으로 진입하게 된다. 정지 구간에서는 유체력에 의한 토크( $T_D$ )는 0이 되고 토크손실( $T_L$ ) 중에서 기계적 손실( $T_F$ )이 작용하게 된다. 기계적 손실은 다음과 같이 표현된다(Isermann[2005]).

$$T_F = T_{F0} \text{sign}(\omega) + T_{F1} \omega \quad (6)$$

여기서  $T_{F0}$ 는 마찰 계수를 나타내고 회전각속도에 비례하여  $\text{const.} \times \omega$ 로 나타낼 수 있다.  $T_{F1}$ 은 회전축과 수직인 방향으로의 마찰계수이다. 여기서  $T_{F1}$ 의 값은 작으므로 무시하면  $T_F = c\omega$ 로 모델링할 수 있다. 따라서 정지 구간에서 토크손실( $T_L$ )은 전 시간에서의 회전각속도에 비례하여 감소하도록 모델링하였다. 비례상수( $c$ )는 시스템의 마찰과 관련되기 때문에 비례상수가 커지면 마찰이 커져서 빨리 정

지하고 작아지면 늦게 정지하게 된다. 비례상수의 정확한 값은 시스템의 무게 및 마찰에 영향을 받게 되는데 본 논문에서는 정지 구간이 고려되어 구현되는데 초점을 맞추었다. 비례상수( $c$ )는 Liu et al.[2011] 결과와의 비교를 통해 선정하였으며 0.01을 사용하였다. 정지 구간은 현재의 회전각속도가 1보다 작아지면 계산이 종료되도록 모델링하였다.

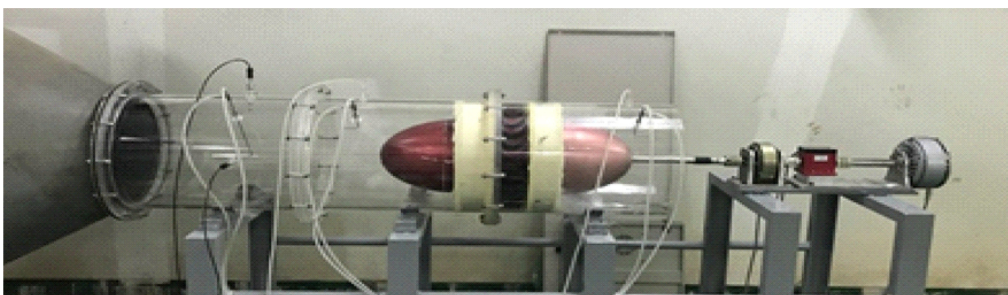
### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 실험결과와의 비교

선박해양플랜트연구소에서 임펄스 터빈의 비정상상태 유입류에 따른 성능 시험을 수행하였다(Kim et al.[2019]). Fig. 2는 시험 장치를 나타낸다. 유입류를 구현하는 드럼의 크기는 직경 1 m, 길이 1.5 m로 구성되어 있다. 드럼 내부 피스톤의 왕복운동에 의해 유입류가 구현되어 덕트로 유입되고 임펄스 터빈을 지나 오른쪽 출구로 배출된다. 임펄스 터빈이 포함된 덕트의 길이는 0.8 m이고 직경은 0.38 m이다. 임펄스 터빈은 덕트 출구로부터 덕트 길이의 1/3 위치에 놓여 있다. 로터의 관성모멘트는 0.0873 kg-m<sup>2</sup>이다.

임펄스 터빈에 유입되는 유입류로는  $A|\cos(2\pi/T)|$  형태의 정현파를 고려하였다. 여기서  $A$ 는 진폭을 나타내고 15 m/s를 사용하였다.  $T$ 는 주기를 나타내고 5초를 사용하였다. 진폭과 주기는 실험에서 사용한 값을 나타낸다(Kim et al.[2019]). 터빈에 유입되는 파의 운동으로 인해 터빈에 유입되는 유입류의 방향이 바뀌니 터빈의 입출구 형상이 대칭을 이루기 때문에  $\cos$ 에 절대 값을 사용하여 한쪽방향에서만 공기가 유입되는 것으로 가정하였다.

Fig. 3은 토크손실( $T_L$ )이 0 Nm이고 관성모멘트( $I$ )는 0.0873 kg-m<sup>2</sup>일 때의 시간에 따른 회전각속도의 수렴곡선을 보여준다. 실험에서는 회전각속도가 유입류의 변화에 따라 진동하는 것을 확인할 수 있다. 회전각속도는 1250 rpm에서 수렴하였다. 제안한 방법에서는 회전각속도가 0에서부터 수렴된 값으로 증가하는 부분에서는 유입류의 변화에 따른 진동이 있는 것을 볼 수 있으며 회전각속도는 1380 rpm에서 수렴하였다. 수렴된 회전각속도는 실험보다 약 10% 크게 예측하였다. 제안한 방법에서는 마찰이 0이지만 실제 실험에서는 마찰이 존재하고 실험의 불확실성을 고려한다면 10%정도의 차이는 크지 않은 것으로 판단된다. 제시한 방법에서 기계적 손실( $T_F$ )을 고



(a) Test facility



(b) Impulse turbine

Fig. 2. Experiment for impulse turbine (Kim et al.[2019]).

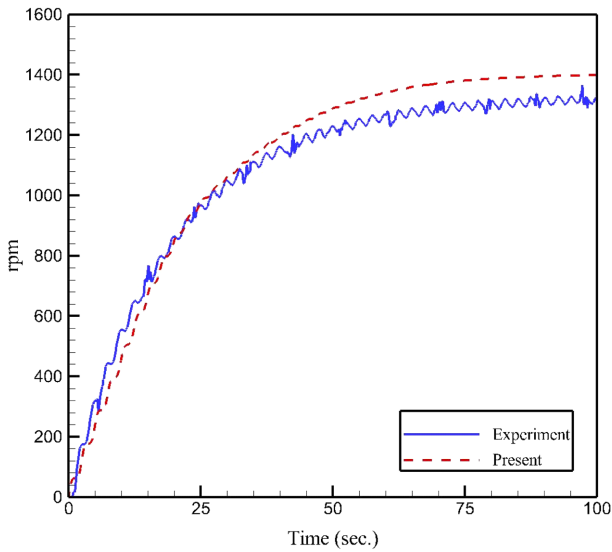


Fig. 3. rpm convergence history.

려한다면 수렴되는 각속도가 작아서 실험과 매우 유사한 값을 얻을 수 있을 것으로 여겨진다. 본 결과에서는 실험과 같이 유입류 변화에 따른 진동이 잘 보이지 않으나 실제 수렴된 회전수는 작은 범위에서 진동하였다. 제안한 방법에서는 관성력에 의한 힘이 커서 유입류 변화에 대해 회전수가 민감하게 변화하지 않아 진동이 매우 작은 결과를 얻었다. 제안한 방법이 실험과의 차이는 존재하지만 빠르고 일정한 정확도로 결과를 제시하기 때문에 그 효용성은 확인할 수 있다.

3.2 설계변수에의 영향

다음으로 여러 가지 설계변수에의 영향을 살펴보기로 하였다. 우선 발전기의 반력토크 손실( $T_r$ )의 영향을 알아보았다. 기계적 손실( $T_f$ )은 일정하다고 간주하고 토크 손실( $T_L$ )을 0, 0.5, 1, 1.5 Nm로 고려하고 계산하였다. Fig. 4는 반력토크 손실 변화에 따른 회전속

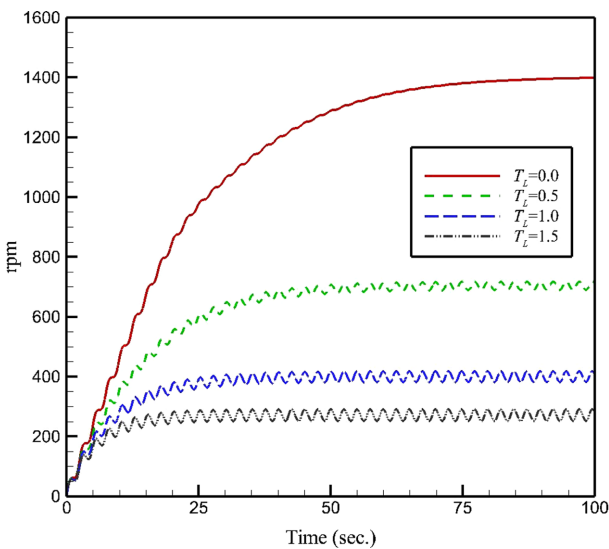


Fig. 4. rpm convergence history for various  $T_L$ .

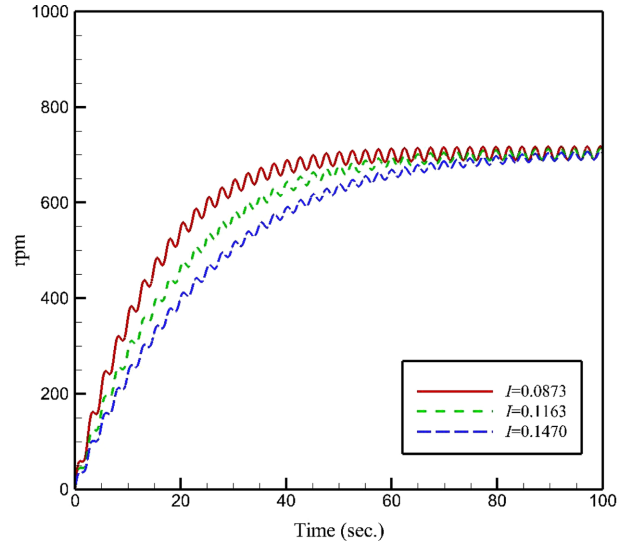


Fig. 5. rpm convergence history for various  $I$ .

도의 수렴곡선을 나타낸다. 반력토크 손실이 수렴되는 회전속도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 회전속도가 클수록 일정한 반력토크 손실에 대해 회전속도가 더 크게 감소하는 것을 알 수 있다. 반력토크 손실이 있는 경우 유입류의 변화에 따른 진동이 명확히 보이는 것을 알 수 있다. Fig. 5은 관성모멘트의 변화에 따른 회전속도의 수렴곡선을 나타낸다. 실제 발전기에는 반력토크 손실이 존재하기 때문에 반력토크 손실을 0.5 Nm에 대해 계산을 진행하였다. 관성모멘트가 클수록 터빈의 무게가 무겁기 때문에 수렴되기까지의 시간이 많이 요구되는 것을 볼 수 있다. 이는 관성모멘트가 클수록 변화가 작은 것을 의미한다. 관성모멘트를 크게 하면 유입되는 파고가 변화되어도 일정하게 회전수를 유지시켜주는 장점이 있는 것을 알 수 있다. 관성모멘트가 바뀌어도 수렴된 후의 회전수는 동일한 것을 알 수 있다. Fig. 6은 유입류의 진폭에 따른 영향을 나타낸다. 진폭이 커질수록 수렴되는 회전각속도가 큰 것을 볼 수 있

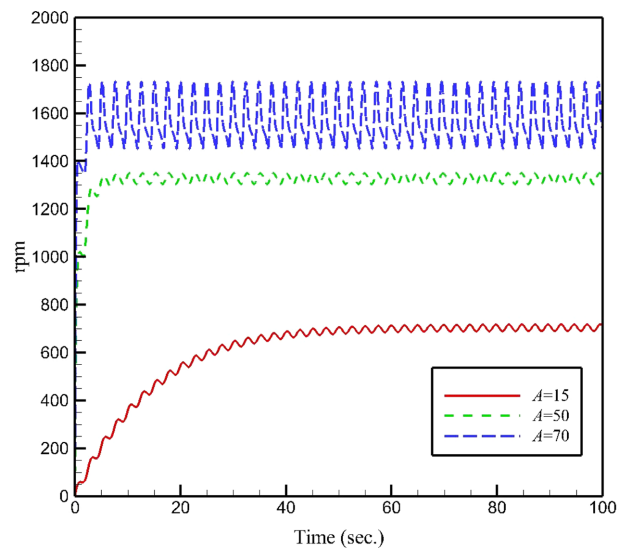


Fig. 6. rpm convergence history for various  $A$ .

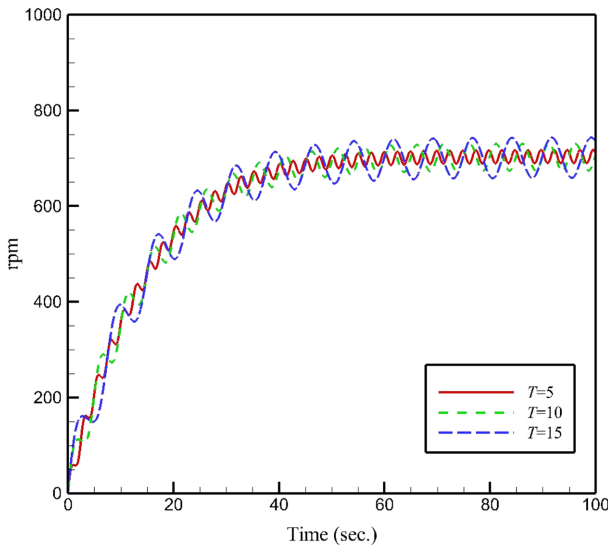


Fig. 7. rpm convergence history for various  $T$ .

다. 또한, 진폭이 큰 경우에는 수렴될 때까지 짧은 시간이 요구되는 것을 볼 수 있다. 반대로 유의 파고가 낮은 해안에서는 터빈의 가속시키는데 시간이 오래 걸리는 것을 예측할 수 있다. Fig. 7은 유입류의 주기에 따른 영향을 나타낸다. 유입류가 주기가 바뀌어도 수렴되는 회전각속도가 일정한 것을 알 수 있다. 또한, 수렴되는 시간도 동일한 것을 알 수 있다. 다만 유입류의 주기가 클수록 회전각속도의 진동하는 폭이 커지는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 정지 구간(Stopping mode)에서의 회전각속도의 변화를 나타낸다. 유입류가 유입을 멈추는 시간을 5, 10, 15, 30초로 달리 하면서 회전각속도의 변화를 계산하였다. 기계적 손실( $T_F$ )이 회전각속도에 비례하기 때문에 회전각속도가 전 시간의 회전각속도에 비례해서 감소하는 것을 볼 수 있다.

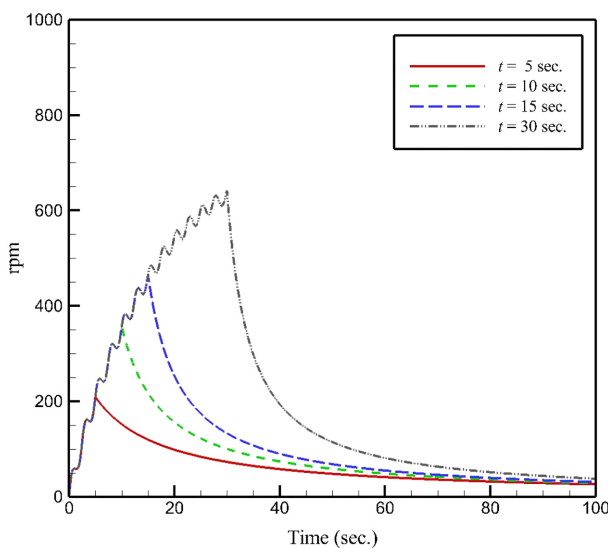


Fig. 8. rpm convergence history for various stopping times.

## 4. 결 론

해상의 불규칙파와 같은 비정상상태의 유입류를 고려한 터빈의 성능을 예측하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 빠르고 설계에서 사용할 수 있을 정확도를 가지고 있는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 실용적인 방법은 뉴턴의 운동방정식을 이용한다. 전산유체역학 해석을 통해 얻어진 정상상태 유입류에 대한 계산결과를 뉴턴의 운동방정식에 대입하여 회전각속도를 계산할 수 있다. 정지 구간에서는 토크손실( $T_L$ )이 회전각속도에 비례하도록 모델링하였다. 수치안정성을 위하여 정지 상태에서 터빈성능 계산 시 토크손실( $T_L$ )을 서서히 증가시켰으며 제안한 방법은 C++프로그래밍 언어를 이용하여 구현하였다.

회전각속도에 대한 해석 결과 실험결과보다 약 10% 크게 계산되었다. 실험에서의 기계적 손실과 불확실성을 고려하면 10%의 차이는 크지 않은 것으로 여겨진다. 토크 손실( $T_L$ )이 커질수록 수렴되는 회전각속도가 감소하는 결과를 얻었다. 관성모멘트( $J$ )가 커질수록 수렴되는데 오랜 시간이 소요되는 것을 확인하였고 관성모멘트의 변화는 수렴되는 회전각속도에 영향을 주지 않았다. 터빈에 유입되는 유입류의 진폭이 커질수록 수렴되는 회전각속도가 증가되었다. 유입류의 주기가 변화되어도 회전각속도가 수렴되는 시간과 수렴된 값에는 변화가 없었다. 다만 유입류의 변화에 따른 회전각속도의 진동이 큰 것을 확인할 수 있었다. 정지 구간에서는 회전각속도에 비례하여 회전각속도가 감소하는 것을 볼 수 있었다.

## 후 기

본 논문은 연구재단의 신진연구지원사업(NRF-2015R1C1A1A02037577, NRF-2018R1A1A1A05020799)과 해양수산부의 국가연구개발사업인 “방파제 연계형 파력발전 융복합 기술개발”에 의해 수행되었으며(PMS4030), 연구비 지원에 감사드립니다.

## References

- [1] Badhursha, R., Dudhgaonkar, P., Jalihal, P., Samad, A., 2018, High efficiency design of an impulse turbine used in oscillating water column to harvest wave energy, *Renewable Energy*, 121, 344-354.
- [2] Cui, Y., Hyun, B.-S., 2016, Numerical study on Wells turbine with penetrating blade tip treatments for wave energy conversion, *Int. J. Nav. Arch. Ocean Eng.*, 8(5), 456-465.
- [3] Cui, Y., Hyun, B.-S., Kim, K., 2017, Numerical study on air turbines with enhanced techniques for OWC wave energy conversion, *China Ocean Eng.*, 31(5), 517-527.
- [4] Cui, Y., Liu, Z., Zhang, X.X, Xu, C.L., Shi, H.D., Kim, K.W., 2019, Self-Starting Analysis of an OWC Axial Impulse Turbine in Constant Flows: Experimental and Numerical Studies, *Appl. Ocean Res.*, 82, 458-469.
- [5] Hong, K.Y. *et al.*, 2016, Development of OWC Wave Energy

- Utilization System, Final Report of Korea Research Institute of Ships and Oceans Engineering, Oceans & Fisheries R&D Report, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [6] Hong, K.Y. *et al.*, 2017, Development of Wave Energy Converters Applicable to Breakwater and Connected to Micro-grid with Energy Storage System, Interim Report of Korea Research Institute of Ships and Oceans Engineering, Ministry of Oceans and Fisheries.
- [7] Hyun, B.S., Moon, J.S., Hong, S.W., 2004, Effect of Guide Vane on the Performance of Impulse Turbine for Wave Energy conversion, *J. Ocean Eng. Technol.*, 18(6), 1-7.
- [8] Isermann, R., 2005, *Mechatronic Systems Fundamentals*, Springer, London, UK.
- [9] Kim, K., Hong, K., Kim, K.-H., Hyun, B.-S., 2019, Design and performance analysis of impulse turbine for 30 kW-class OWC-type wave energy converter installed at breakwater, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 22(3), 182-289.
- [10] Liu, Z., Jin, J., Hyun, B.-S., Shi, H., Hong, K., 2011, Transient calculation of impulse turbine or oscillating water column wave energy converter, 9th European Wave and Tidal Energy Conference Series, Southampton, UK, 5-9 September.
- [11] Liu, Z., Cui, Y., Li, M., Shi, H., 2017, Steady state performance of an axial impulse turbine for oscillating water column wave energy converters, *Energy*, 141, 1-10.
- [12] Liu, Z., Cui, Y., Xu, C.L., Shi, H.D., Kim, K.W., 2018, Transient simulation of OWC impulse turbine based on fully passive flow-driving model, *Renewable Energy*, 117, 459-473.
- [13] Lopes, B.S., Gato, L.M.C., Falcao, A.F.O., Henriques, J.C.C., 2019, Test results of a novel twin-rotor radial inflow self-rectifying air turbine for OWC wave energy converters, *Energy*, 170(1), 869-879.
- [14] Setoguchi, T., Kaneko, K., Taniyama, H., Maeda H., Inoue M., 1996, Impulse Turbine with Self Pitch-controlled Guide Vanes for Wave Power Conversion: guide vanes connected by links, *Int. J. Offshore Polar Eng.*, 6(1), 76-80.
- [15] Setoguchi, T., Santhakumar, S., Maeda, H., Takao, M. and Kaneko, K., 2001, A Review of Impulse Turbines for Wave Energy Conversion, *Renewable Energy*, 23(2), 261-292.
- [16] Yang, S.K., Kim, K.W., Lee, J.K. and Hyun, B.S., 2017, A Numerical Study on the Effect of Blade Sweep Angle of Impulse Turbine for Wave Energy Conversion, *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 20(3), 145-151.

---

Received 3 December 2019

1st Revised 3 February 2020, 2nd Revised 19 February 2020

Accepted 20 February 2020