



# 범용 조력발전 최적운영 알고리즘 개발

조철희<sup>1)</sup> · 이용호<sup>2)</sup> · 이송이<sup>2)</sup> · 황수진<sup>1)</sup>\*

## Development of a General Algorithm for Optimal Operation of Tidal Power Plant

Chulhee Jo<sup>1)</sup> · Yongho Lee<sup>2)</sup> · Songyi Lee<sup>2)</sup> · Sujin Hwang<sup>1)</sup>\*

Received 15 June 2018 Revised 28 August 2018 Accepted 7 September

**ABSTRACT** Tidal energy is one of the promising renewable energy resources in Korea. Tidal energy has great advantages over other renewable energies because of its high energy density, reliability, and predictability. Tidal energy can be estimated precisely by tide harmonic analysis in advance. Therefore, it is essential to make an optimal operation plan to maximize the power generation of tidal power plants. The Sihwa lake tidal power plant is the world's largest tidal power installation with a total power output capacity of 254 MW. The power station was constructed in 2011 and has been operating successfully since then. The Sihwa lake tidal power plant developed the K-TOP (Kwater Tidal power Operation Program) to optimize the operation and maximize the output. In this paper, algorithms for ebb generation and double-effect generation were developed to expand the generality of K-TOP. The simulation results of K-TOP were verified by comparing it with the operational data of the Sihwa lake tidal power plant.

**Key words** Tidal barrage(조력발전), General optimal operation program(범용 최적운영 프로그램), Sihwa-lake tidal power plant(시화조력발전소), Flood generation(창조발전), Ebb generation(낙조발전), Double-effect generation(복류식발전)

### Nomenclature

A : cross sectional area, m<sup>2</sup>  
C : flow coefficient  
E : electric generation, MWh  
g : gravity acceleration, m/s<sup>2</sup>  
H : head, m  
H<sub>loss</sub> : head loss, m  
H<sub>net</sub> : net head, m  
P : power, MW  
P<sub>loss</sub> : power loss, MW

Q : flow rate, m<sup>3</sup>/s  
t : time, min  
η : turbine efficiency  
ρ : seawater density, kg/m<sup>3</sup>  
n : number

### subscript

l : lower  
t : turbine  
g : gate  
u : upper

1) Inha University

2) Korea Water Resources Corporation

\*Corresponding author: sjhwang@inha.edu

Tel: +82-32-860-7342

Fax: +82-32-864-5850

## 1. 서론

조석에너지는 규칙적이고 연속적이며 조화분석을 통해 예측이 가능한 신뢰성 높은 에너지원이다. 우리나라의 서해안은 조석에너지가 풍부하여 개발이 유망한 지역이 많다고 세계적으로 알려져 있다. 특히 세계 최대 규모의 조력발전소인 시화호 조력발전소가 2011년에 완공되어 성공적으로 운영되고 있다<sup>[1]</sup>. 시화호 조력발전소의 시설용량은 254 MW이고 연간발전량은 552GWh이며 2018년 1월까지 총 29억 kWh의 전력을 공급하였다. 시화호 조력발전소는 방조제 내측의 도시건설과 홍수 및 침수 등의 피해예방을 위해 호수위가 EL. -1m로 제한되므로 썰물 시 조지의 해수를 배수하고 밀물 시 외해와 조지의 수위차를 이용하여 발전하는 단류식 창조발전 방식으로 운영되고 있다<sup>[2,3]</sup>.

조력발전의 발전방식은 시화호 조력발전소에 적용된 단류식 창조발전 외에도 단류식 낙조발전과 복류식 발전이 있다. 단류식 낙조발전은 단류식 창조발전과 반대로 밀물 시 조지에 해수를 충수하고 썰물 시 조지와 외해의 수위차를 이용하여 발전하는 방식이며, 복류식 발전은 밀물 및 썰물 시 모두 발전하는 방식이다<sup>[4]</sup>. 시설용량이 240MW인 프랑스의 Rance 조력발전소는 1966년에 준공되어 현재까지 운영되고 있으며 조위와 전력수요에 따라 단류식 낙조발전 및 복류식 발전 방식으로 운전되고 있다<sup>[5]</sup>. 1984년에 완공된 캐나다의 20MW급 Annapolis 조력발전소는 단류식 낙조발전 방식으로 운전되고 있다<sup>[6]</sup>. 이와 같이 조력발전소는 입지와 환경조건에 따라 최적운영 발전방식이 달라진다.

시화호 조력발전소는 발전량을 최대화하기 위해 조력발전 운영 경험을 바탕으로 조력발전소 최적운영 프로그램인 K-TOP(Kwater Tidal power Operation Program)을 개발하여 조력발전소 운영계획 수립 및 가동에 활용하고 있다. 시화호 조력발전소의 최적운영을 위해 개발된 K-TOP 프로그램은 시화호 조력발전소의 발전방식인 단류식 창조발전의 해석 알고리즘만을 탑재하고 있어 범용성과 적용성이 제한된다.

본 연구에서는 K-TOP 프로그램의 단류식 창조발전 알고리즘을 기반으로 단류식 낙조발전 및 복류식 발전의 해석이 가능한 범용 조력발전 최적운영 알고리즘을 개발하였

다. 단류식 낙조발전 및 복류식 발전의 해석에 필요한 수식 및 제원은 K-TOP 프로그램에서 사용한 시화호 조력발전소의 자료를 사용하였으며, 시화호 조력발전소의 조위데이터를 기반으로 해석을 수행하였다.

## 2. 범용 조력발전 최적운영 알고리즘

K-TOP은 시화호 조력발전소의 운영데이터와 경험을 바탕으로 개발된 조력발전 최적운영 프로그램이며, 주요 기능은 최적운영 해석, 조위데이터 관리, 해석 결과 분석이다. 2011년에 상업발전을 개시한 이후부터 2015년까지 VBA(Visual Basic for Application) 기반의 K-TOP1.0을 개발하고 사용하였으며, 2016년에 MS Visual Studio의 C#으로 개발환경을 변경하고 오픈소스 S/W를 활용하여 Architecture를 설계한 K-TOP2.0을 개발하였다<sup>[2]</sup>.

본 연구에서는 시화호 조력발전소에 최적화된 K-TOP의 알고리즘을 기반으로 다양한 발전방식의 해석이 가능하도록 보완하여 범용 조력발전 최적운영 알고리즘을 개발하였다. 이를 위해 먼저 K-TOP에서 사용하는 단류식 창조발전 알고리즘의 구조와 모듈을 분석하고 이를 최적화하였으며, 최적화된 단류식 창조발전 알고리즘을 바탕으로 단류식 창조발전, 단류식 낙조발전, 복류식 발전을 모두 해석할 수 있는 범용 알고리즘을 개발하였다.

### 2.1 K-TOP 구성

#### 2.1.1 최적운영 해석

K-TOP의 해석모듈은 해석기간에 따라 단일발전, 기간발전, 주간발전으로 구분된다. 단일발전은 1주기의 조위데이터에 대한 조력발전 최적운영 해석을 수행하기 위해 사용되고, 기간발전은 임의의 기간 동안의 해석을 수행하는데 사용된다. 주간발전은 조력발전소의 주간운영계획을 작성하기 위해 사용하는 모듈이다. 각 해석모듈에서는 입력된 기간 동안의 조위데이터를 취득하고 발전 방식, 초기 호수위 등 사용자 설정에 따라 조력발전 최적운영 해석을 수행하여 발전량이 최대가 되는 운영 시나리오를 도출한다.

### 2.1.2 조위데이터 관리

K-TOP에서 조위데이터는 예측조위와 실측조위로 구분되며 1분단위의 해수위 및 조위상태를 연도별로 데이터베이스화하여 관리한다. 조위상태는 밀물, 만조, 썰물, 간조로 구분된다. SCADA(Supervisory Control and Data Acquisition) 시스템과 연계된 환경에서는 조위 모니터링 모듈을 통해 데이터베이스의 조위데이터와 실시간 실측 조위를 비교하고 분석할 수 있다.

### 2.1.3 해석 결과 분석

K-TOP은 조위데이터와 최적운영 해석 결과에 대한 비교분석을 위한 모듈을 제공한다. 조위데이터 분석 모듈에서는 데이터베이스의 예측조위와 실측조위 데이터를 주기별로 비교분석하여 각 주기별로 오차를 검토할 수 있으며, 최적운영 해석 결과 분석 모듈에서는 사용자 입력 조건에 따른 다양한 최적운영 시나리오를 비교할 수 있다.

## 2.2 발전량 산정

시화호 조력발전소는 횡축 벌브형 카플란수차와 112극의 횡축 3상 동기발전기를 사용하여 1일 2회 발전한다. 일정기간( $t_1 \sim t_2$ )동안 조력발전소에서 생산되는 발전량  $E$ 는 식 (1)과 같이 산정한다.

$$E = \int_{t_1}^{t_2} (P - P_{loss}) dt \quad [MWh] \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 단일 발전기의 발전출력이며 식 (2)와 같이 산정하고,  $P_{loss}$ 는 발전기 손실이며 발전기의 특성에 따른 산정식을 사용하여 계산한다.

$$P = \eta \rho g Q_t H_{net} \quad [MW] \quad (2)$$

여기서  $\eta$ 는 수차효율,  $\rho$ 는 해수의 밀도,  $g$ 는 중력가속도,  $Q_t$ 는 발전유량,  $H_{net}$ 는 순수두이다. 수차효율과 발전유량은 낙차구간에 따른 설비의 특성곡선에 의해 산정되며, 순수두는 식 (3)과 같이 낙차( $H$ )에서 수두손실( $H_{loss}$ )을 제외한 값이다.

$$H_{net} = H - H_{loss} \quad [m] \quad (3)$$

여기서 낙차는 해수위에서 호수위를 뺀 값으로 정의하며, 수두손실은 설비의 특성에 따라 결정된다.

## 2.3 배수량 산정

수문의 배수량  $Q_g$ 는 식 (4)와 같이 산정한다.

$$Q_g = C n_g A \sqrt{2gH} \quad [m^3/s] \quad (4)$$

여기서  $C$ 는 유량계수,  $n_g$ 는 수문의 개수,  $A$ 는 유동면적이다.

유량계수는 설비의 특성과 해양환경에 따라 적합한 값을 적용해야 한다. 본 연구에서는 시화호 조력발전소의 설비 특성을 사용하였기 때문에 유량계수 또한 K-TOP에서 사용하는 값을 적용하였다. 시화호 조력발전소에서는 배수시험 결과를 바탕으로 유량계수를 도출하여 사용하고 있다. 시화호 조력발전소의 수차 유량계수는 0.98이고 주수문 유량계수는 0.95이며, 배수갑문 유량계수는 0.65이다.

조력발전소의 수문이 개폐되는 동안에는 개폐율에 따라 수문의 유동면적이 변하면서 배수량이 달라진다. 수문이 개폐되는 동안 배수량을 산정하기 위해 시화호 조력발전소에 적용된 롤러 게이트 형식의 수문은 개폐가 일정한 속도로 진행된다고 가정하여 수문의 배수량은 작동시간에 비례하여 선형적으로 증가한다고 가정하였다.

시화호 조력발전소에서는 조력발전소를 시공하면서 설치한 8문의 주수문과 기존에 시화 방조제에 설치되어 있던 8문의 배수갑문을 운영하고 있다. 주수문의 폭은 15.3m이고 높이는 12m이며, 배수갑문의 폭은 12m이고 높이는 6.5m이다. 따라서 수문의 개폐 시 유동면적은 작동시간에 따라 주수문은 최소  $0m^2$ 에서 최대  $183.6m^2$ 까지, 배수갑문은 최소  $0m^2$ 에서 최대  $78m^2$ 까지 선형적으로 증가한다.

배수 시 수문의 작동과 함께 수차 리버스 모드를 추가로 가동하여 배수량을 증가시킬 수 있으며, 시화호조력발전소에서는 수차발전기 가동속도의 약 30%로 수차 리버스 모드를 운영하고 있다. 수차 리버스 모드의 배수량은 수차시험을 통해 도출된 낙차에 따른 유량 다항식을 사용하여 산정한다.

### 2.4 단류식 창조발전 알고리즘 최적화

범용 조력발전 최적운영 알고리즘을 개발하기 위해 K-TOP에서 사용하는 단류식 창조발전 알고리즘의 최적화를 수행하였다. K-TOP의 단류식 창조발전 해석 알고리즘은 그림 1과 같이 조위탐색모드, 배수모드, 발전모드, 대기모드로 구성된다. 조위탐색모드는 낙차 및 조위상태에 따라 적합한 모드에 진입하도록 분기시키는 탐색모드이다. 배수모드에서는 주수문, 배수갑문, 수차의 배수량을 산정하며, 발전모드에서는 일차원 비구속 최적화문제인 최적발전량 산정 문제를 해결하기 위해 다양한 탐색법을 사용하여 발전 개시 낙차에 따른 최대발전량을 산정한다. 발전모드 및 배수모드로 분기되지 않는 경우에는 대기모드에 진입하여 수문 및 수차의 작동이 정지되고 해수의 유동이 없는 대기상태를 유지한다.

#### 2.4.1 조위탐색모드

조위탐색모드는 입력된 조위데이터의 조위상태와 낙차에 따라 각 모드의 분기조건을 검토하여 적합한 모드로 분기시키는 탐색모드이다. 입력된 시계열 조위데이터를 탐색

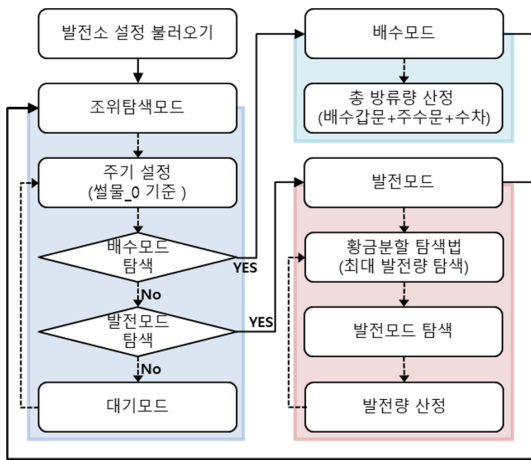


Fig. 1. Simulation algorithm of K-TOP

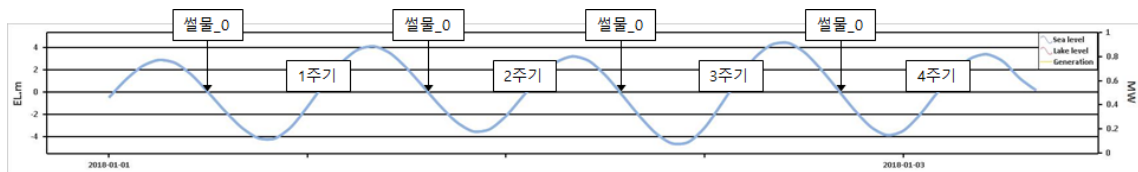


Fig. 2. Division of tide data

하면서 발전모드 및 배수모드의 분기조건을 확인하여 해당 모드에 진입하며, 해당하지 않으면 대기모드에 진입하고 다음 조위데이터로 넘어간다.

K-TOP에서는 단일발전과 주간발전 및 기간발전의 조위데이터 처리 구조가 달라 별도의 알고리즘에서 해석을 수행한다. K-TOP에서 단일발전은 사용자가 입력한 조위데이터 전체를 일괄적으로 해석하고 주간발전 및 기간발전에서는 그림 2와 같이 썰물시 EL. 0m인 시점(셸물\_0)을 기준으로 입력된 조위데이터를 분할하고 주기를 부여하여 해석을 수행한다.

그러나 단일발전과 주간발전 및 기간발전은 동일한 모듈로 구성되어 있기 때문에 조위데이터 처리 구조를 통일하여 중복된 알고리즘을 하나의 알고리즘으로 통합하였다. 조위데이터를 분할하고 주기를 부여하여 해석하는 주간발전 및 기간발전의 방식이 입력된 조위데이터를 일괄적으로 해석하는 단일발전의 방식보다 체계적이고 효율적이므로 통합 알고리즘은 주간발전 및 기간발전의 알고리즘을 기반으로 개발하였다.

#### 2.4.2 배수모드

배수모드에 진입하면 조위상태와 낙차를 기준으로 수문의 개폐여부와 수차 리버스 모드 기동 여부를 결정하고 이를 바탕으로 매분마다 배수량이 산정된다. 이때 운용되는 수문과 수차의 개수를 지정하여 수문이나 수차가 고장 또는 유지보수로 인해 사용이 제한되는 경우에 대한 시나리오를 해석할 수 있다. 또한 사용자가 수문제한시간을 설정하여 특정 시간대에 배수를 제한할 수 있다.

기존의 K-TOP에서는 반복문의 시작지점에서 배수종료 여부를 판단하여 해석결과를 저장하였다. 이 경우 배수 도중에 사용자 입력시간이 끝나는 등의 원인으로 인해 반복문이 배수종료 여부를 거쳐 정상적으로 종료되지 않으면 해당 사이클의 배수 결과가 저장되지 않는 문제가 발생할 수

있다. 이를 해결하기 위해 반복문 종료 이후에 별도로 배수 결과를 저장하도록 수정하였다.

### 2.4.3 발전모드

발전모드는 최대 발전량 탐색, 발전모드 탐색, 발전량 산정의 3가지 기능으로 구분되어 있다. 최대 발전량 탐색 기능에서는 발전개시 낙차에 따른 발전량을 검토하여 발전량이 최대가 되는 경우를 최적 결과로 도출한다. K-TOP에서는 발전량이 최대가 되는 시나리오를 도출하기 위해 다양한 탐색법을 사용하였다.

발전개시 낙차의 최소값은 발전기의 발전가능 최저낙차이고 최대값은 조위의 극값과 현재 호수위 차이에 해당하는 낙차이며 최적 발전개시 낙차는 최소값에서 최대값 사이에 위치한다. 따라서 제한된 변수 범위 내에서 정확한 최적값을 효율적으로 도출할 수 있는 황금분할 탐색법이 적합하다고 판단하여 통합 알고리즘에서는 아래와 같이 황금분할 탐색법만을 사용하여 최대 발전량을 탐색하도록 수정하였다.

- 1) 현재의 상한 값이  $H_u$ 이고 하한 값이  $H_l$ 일 때, 식 (5) 및 (6)과 같이 황금분할을 수행하여  $H_1$ 과  $H_2$ 를 계산한다.
- 2) 발전개시 낙차가  $H_u$ 인 경우와  $H_l$ 인 경우에 대해 발전량을 산정하고 비교하여  $H_u$ 에서의 발전량이 크면  $H_l$ 을 새로운 하한 값으로 사용하고  $H_1$ 이 크면  $H_2$ 를 새로운 상한 값으로 사용한다.
- 3)  $H_u$ 와  $H_l$ 의 차이가 허용오차보다 작을 때까지 1)과 2)를 반복하여 수렴하면  $H_u$ 와  $H_l$ 의 중간 값이 최적 발전개시 낙차이다.

$$H_1 = H_u - (H_u - H_l)/\phi \quad [m] \quad (5)$$

$$H_2 = H_l + (H_u - H_l)/\phi \quad [m] \quad (6)$$

여기서  $\phi$ 는 황금비이며 식 (7)과 같다.

$$\phi = \frac{1 + \sqrt{5}}{2} \quad (7)$$

조위탐색모드에서 낙차가 발전가능 최소낙차에 도달하면 발전모드에 진입하여 최적 발전 시나리오를 탐색한다. 황금분할 탐색 과정에서 도출되는 발전개시 낙차들은 발전가능 최소낙차와 최대낙차 사이의 값이므로 발전모드 진입 이후 발전개시 낙차에 도달하기까지 대기해야 한다. 최대 발전량 탐색 기능에서 발전개시 낙차가 도출되면 발전모드 탐색 기능을 통해 발전모드 진입 시점부터 발전개시 낙차에 도달하는 시점까지 대기상태를 유지한다. 발전개시 낙차에 도달하면 발전량 산정 기능에서 해당 발전개시 낙차에서의 발전량을 계산하여 최대 발전량 탐색 기능에 전달한다. 최대 발전량 탐색 기능에서는 각 발전개시 낙차에서의 발전량을 비교하여 발전량이 최대가 되는 시나리오를 도출한다.

## 3. 범용 알고리즘 개발

조력발전 최적운영 알고리즘에서 각 모드를 구성하는 주요 요소는 설비의 특성을 반영하여 운영결과를 도출하는 수식과 조위데이터에 따라 적합한 모드에 진입하도록 제어하는 분기조건이다. 알고리즘을 통해 도출된 조력발전소 운영 시나리오에 조력발전소 설비의 실제 성능이 반영될 수 있도록 설비의 종류와 특성에 부합하는 수식을 사용해야 한다. 분기조건은 해석 시나리오에 영향을 미치기 때문에 발전방식에 따라 적합한 시나리오가 도출될 수 있도록 개발되어야 한다. 본 연구의 목적은 다양한 발전방식에 적용할 수 있는 범용 알고리즘의 개발이므로 발전방식에 따른 시나리오에 영향을 미치는 분기조건을 중심으로 개발하였다.

### 3.1 단류식 낙조발전 알고리즘

단류식 낙조발전은 밀물 시 발전하고 썰물 시 배수하는 단류식 창조발전에서 발전과 배수의 방향이 반대인 발전방식으로 밀물 시 충수하고 썰물 시 발전한다. 따라서 단류식 낙조발전은 단류식 창조발전과 동일한 설비를 사용하지만 설비의 방향이 반대이기 때문에 단류식 창조발전 알고리즘에서 낙차와 유량의 부호를 바꾸고 분기조건을 변경하면 단류식 낙조발전 알고리즘을 개발할 수 있다. 단류식 창조발전 알고리즘의 주요 분기조건은 다음과 같다.

- 1) 아래의 조건을 만족하면 배수모드 진입
  - ① 쓸물이거나, 밀물이면서 낙차가 0보다 작음
  - ② 낙차 - 수문개방 개시낙차 < 방류 개시낙차
  
- 2) 아래의 조건을 만족하면 발전모드 진입
  - ① 밀물이거나 만조
  - ② 호수위 < 발전정지 호수위
  - ③ 낙차 ≥ 발전 개시낙차
  
- 3) 조건 ①과 ②를 만족하거나, 조건 ③을 만족하면 발전 정지
  - ① 낙차 < 발전정지 낙차
  - ② 쓸물
  - ③ 호수위 ≥ 발전정지 호수위
  
- 4) 조건 ①과 ②를 만족하거나, 조건 ③을 만족하면 배수 종료
  - ① 낙차 > 0
  - ② 수문폐쇄 모드
  - ③ 수문폐쇄 완료
  
- 5) 아래의 조건을 만족하면 수문폐쇄 모드 개시
  - ① 간조이거나 밀물
  
- 6) 아래의 조건을 만족하면 수문 개방
  - ① (수문 폐쇄 모드 아닌 경우)  
낙차 - 수문 개방 개시낙차 < 방류개시낙차  
(수문 폐쇄 모드인 경우)  
낙차 < 수문 폐쇄 낙차
  
- 7) 아래의 조건을 만족하면 수문 폐쇄
  - ① 수문 폐쇄 모드
  - ② 낙차 > 수문 폐쇄 낙차
  
- 8) 아래의 조건을 만족하면 수차발전기 리버스 기동 시작
  - ① 낙차 < 수차 리버스 기동 낙차
  
- 9) 아래의 조건을 만족하면 수차발전기 리버스 기동 정지
  - ① 낙차 ≥ 수차 리버스 기동 낙차

단류식 낙조발전의 분기조건은 단류식 창조발전의 분기 조건에서 아래와 같이 수정하여 적용하였다.

- 1) 아래의 조건을 만족하면 충수모드 진입
  - ① 밀물이거나, 쓸물이면서 (-)낙차가 0보다 작음
  - ② 호수위 < 발전정지 호수위
  - ③ (-)낙차 - 수문 개방 개시낙차 < 방류 개시낙차
  
- 2) 아래의 조건을 만족하면 발전모드 진입
  - ① 쓸물이거나 간조
  - ② (-)낙차 ≥ 발전 개시 낙차
  
- 3) 아래의 조건을 만족하면 발전 정지
  - ① (-)낙차 < 발전 정지 낙차
  - ② 밀물
  
- 4) 조건 ①과 ②를 만족하거나, 조건 ③을 만족하면 충수 종료
  - ① (-)낙차 > 0m이거나 호수위 > 수문 폐쇄 호수위
  - ② 수문 폐쇄 모드
  - ③ 수문 폐쇄 완료
  
- 5) 조건 ①이나 ②를 만족하면 수문 폐쇄 모드 개시
  - ① 만조이거나 쓸물
  - ② 호수위 ≥ 수문 폐쇄 호수위
  
- 6) 아래의 조건을 만족하면 수문 개방
  - ① (수문 폐쇄 모드 아닌 경우)  
(-)낙차 - 수문 개방 개시낙차 < 방류개시낙차  
(수문 폐쇄 모드인 경우)  
(-)낙차 < 수문 폐쇄 낙차
  - ② 호수위 < 수문 폐쇄 호수위
  
- 7) 아래의 조건을 만족하면 수문 폐쇄
  - ① 수문 폐쇄 모드
  - ② (-)낙차 > 수문 폐쇄 낙차이거나 해수위 ≥ 수문 폐쇄 호수위



- 8) 아래의 조건을 만족하면 수차발전기 리버스 기동 시작
- ① (-)낙차 < 수차 리버스 기동 낙차
  - ② 호수위 < 발전정지 호수위
- 9) 조건 ①이나 ②를 만족하면 수차발전기 리버스 기동 정지
- ① (-)낙차 ≥ 수차 리버스 기동 낙차
  - ② 호수위 ≥ 발전정지 호수위

조지에서 외해로 해수를 방류하는 단류식 창조발전의 배수와 달리 단류식 낙조발전의 충수는 조지에 해수를 채우기 때문에 충수가 완료된 시점의 호수위가 호수위 제한 조건을 만족해야 한다. 단류식 낙조발전에서는 조지의 수위가 높을수록 발전 시 가용낙차가 커져 발전량이 증가하므로 충수 시에 호수위 제한을 만족하는 한도 내에서 최대한 조지에 해수를 채워 호수위를 높여야 한다. 따라서 충수 종료 호수위는 호수위 제한과 같아지도록 시나리오를 작성해야 한다.

그러나 수문 폐쇄가 즉각적으로 수행되지 않고 일정 시간이 소요되기 때문에 충수 종료 호수위가 최적이 되는 수문 폐쇄 시점은 산술적으로 계산할 수 없다. 따라서 충수 종료 호수위를 호수위 제한에 맞출 수 있도록 단류식 낙조발전에서는 그림 3과 같이 충수모드를 추가하였다.

충수모드에서는 수문 폐쇄 호수위를 별도로 정의하고

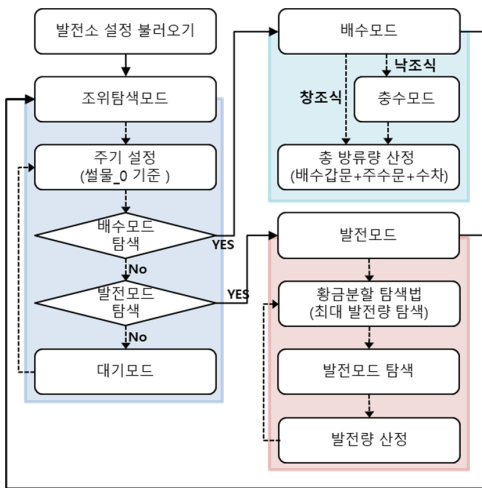


Fig. 3. General algorithm for optimal operation of tidal power plant

호수위가 수문 폐쇄 호수위에 도달하면 수문 폐쇄를 시작하도록 설정하였다. 충수 종료 호수위가 호수위 제한보다 높으면 수문 폐쇄 호수위를 낮춰 좀 더 이른 시점에서 폐쇄가 시작되도록 하였고, 충수 종료 호수위가 호수위 제한보다 낮으면 수문 폐쇄 호수위를 높여 폐쇄를 늦게 시작되도록 하였다. 충수 종료 호수위가 호수위 제한이 같아질 때까지 반복 계산하여 최적 충수 시나리오를 도출하도록 수정하였다.

### 3.2 복류식 발전 알고리즘

복류식 발전은 단류식 창조발전의 창조발전 및 배수와 단류식 낙조발전의 낙조발전 및 충수를 반복하면서 양방향으로 발전하는 방식이다. 따라서 단류식 발전 알고리즘에서 조위데이터의 낙차 및 조위상태에 따라 적합한 모드에 진입할 수 있도록 탐색조건을 변경하여 복류식 발전 알고리즘을 개발하였다.

복류식 발전의 창조발전과 낙조발전은 단류식 발전과 동일한 조건에서 수행되므로 단류식 발전의 조건문을 그대로 사용하도록 구성하였다. 그러나 복류식 발전에서는 단류식 발전과 달리 창조발전과 낙조발전이 번갈아 수행되기 때문에 발전 이후 잔여 낙차를 활용하여 충수 및 배수를 수행함으로써 이후 수행되는 발전에서의 가용낙차를 최대화한다. 즉, 창조발전 직후 잔여 낙차를 활용하여 충수를 수행하고, 낙조발전 직후 배수를 수행한다. 또한 낙차가 작아 해당 주기에서 발전이 불가능한 경우에는 다음 발전에서의 가용낙차를 최대화하기 위해 충수 및 배수를 수행한다. 이러한 배수 모드 및 충수모드의 동작을 위해 아래와 같이 복류식 발전 분기조건을 적용하였다.

- 1) 아래의 조건을 만족하면 배수모드 진입
  - ① 밀물이거나, 썰물이면서 해당 주기에서 발전이 되지 않음
  - ② 낙차 - 수문개방 개시낙차 < 방류 개시낙차
- 2) 아래의 조건을 만족하면 충수모드 진입
  - ① 썰물이거나, 밀물이면서 해당 주기에서 발전되지 않음
  - ② 호수위 < 발전정지 호수위
  - ③ (-)낙차 - 수문 개방 개시낙차 < 방류 개시낙차

### 3.3 알고리즘 검증

본 연구에서 개발된 범용 조력발전 최적운영 알고리즘을 검증하기 위해 그림 4와 같이 2018년 1월의 시화호 조력발전소 발전실적과 비교하였다. 중조기의 평균오차는 3.4%로 예측과 실적이 대체로 일치하는 경향이 나타났으나, 대조기에는 평균 5.4% 오차가 발생하였고, 소조기에는 평균 7.9%의 오차가 발생하였다.

이러한 오차의 원인으로는 산정식과 실제 설비와의 차이, 예측조위와 실제조위의 오차, 퇴적으로 인한 호체적의 변화 등이 있다. 이러한 오차는 관련 자료의 최신화를 통해 감소시킬 수 있다. 특히 산정식과 실제 설비와의 차이를 보정하기 위해 적용하는 손실계수를 통해 실제 설비의 성능과 산정식의 오차를 최소화할 수 있다.

현재 K-TOP에서는 발전 손실계수(0.98)와 유량계수를 일괄적으로 적용하고 있다. 배수와 관련된 유량계수는 각 설비의 시험 기동을 통해 도출되었기 때문에 정확성과 신뢰성이 확보된 수치이다. 그러나 그림 4의 검증결과에 따르면 현재 사용하고 있는 발전 손실계수가 중조기에는 발전실적과 해석결과를 정확하게 보정하지만 대조기와 소조기에

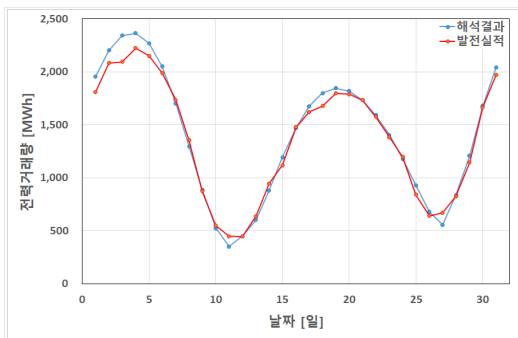


Fig. 4. Comparison of simulation and real operation (2018.01)

는 비교적 큰 오차가 나타나는 것을 확인할 수 있다. 따라서 대조기, 중조기, 소조기에서의 발전 손실계수를 세분화하여 사용하면 알고리즘에서 예측하는 발전량의 정확성과 신뢰성이 높아질 것으로 판단된다.

### 3.4 조력발전 시나리오 분석

조력발전의 발전방식 별 시나리오를 분석하기 위해 개발된 알고리즘을 활용하여 2018년 1월 1일부터 15일까지의 조위데이터에 대한 해석을 수행하였다. 호수위 제한이 시화호 조력발전소의 조건과 동일한 EL, -1m인 경우와 제한이 완화된 EL, 3m인 경우에 대해 해석을 수행하여 비교분석하였다.

#### 3.4.1 단류식 창조발전

먼저 시화호 조력발전소의 조건을 적용하여 단류식 창조발전 시나리오를 도출하였다. 2018년 1월 1일부터 15일까지의 조위데이터를 취득하여 기간발전 해석을 수행하였으며, 호수위 제한과 초기호수위는 EL, -1m로 설정하였다. 해석 결과 그림 5와 같이 먼저 배수모드에 진입하여 호수위를 최대한 낮추고 낙차가 발전개시 낙차가 되면 발전모드에 진입하여 발전량이 최대가 되도록 창조발전을 수행하며 호수위 제한이나 발전정지 낙차에 도달하여 발전이 종료되는 단류식 창조발전 시나리오가 정상적으로 도출되는 것을 확인하였다. 단류식 창조발전에서는 15일 동안 총 20,380 MWh의 전력을 생산한다고 예측되었다.

동일한 조위데이터에서 호수위 제한이 EL, 3m로 완화된 해석결과는 그림 6과 같다. 호수위 제한이 EL, -1m인 해석결과에서 가용낙차가 충분히 확보되어 발전이 발전정지 낙차에 도달한 뒤 종료된 주기에서는 호수위 제한의 완

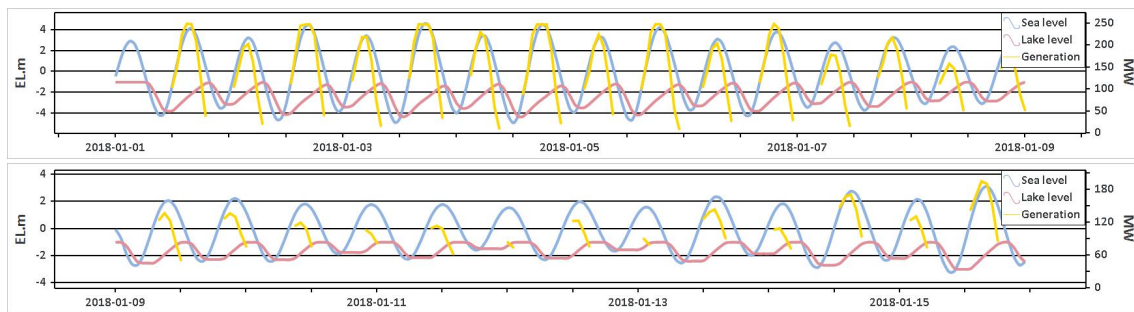


Fig. 5. Flood generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL, -1 m)



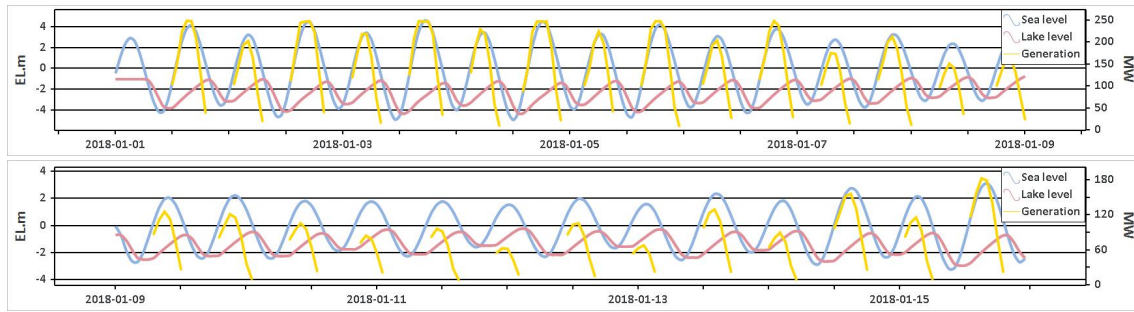


Fig. 6. Flood generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL. 3 m)

화되어도 발전량이 동일하지만, 가용낙차가 작아 발전이 호수위 제한에 의해 정지된 주기에서는 호수위 제한이 완화됨에 따라 발전량이 증가하였다. 호수위 제한이 완화된 경우 단류식 창조발전에서는 발전량이 기존보다 4% 증가하여 총 21,173MWh의 전력을 생산한다고 예측되었다.

### 3.4.2 단류식 낙조발전

시화호 조력발전소와 동일한 조건에서 단류식 낙조발전 해석을 수행하였다. 해석 결과 그림 7과 같이 낙차가 발전 개시 낙차와 같아지면 발전모드에 진입하여 발전량이 최대가 되도록 낙조발전을 수행하고 발전정지 낙차가 되면 발

전을 종료하며 해수위가 호수위보다 높아지면 충수를 수행하고 호수위 제한에 도달하면 충수를 종료하는 단류식 낙조발전 시나리오가 정상적으로 도출되는 것을 확인하였다. 일부 주기에서는 가용낙차가 작아 발전이 되지 않고 대기상태를 유지하였으며, 단류식 낙조발전에서는 15일 동안 총 2,365MW의 전력을 생산한다고 예측되었다. 시화호 조력발전소의 조건에서는 호수위 제한으로 인해 조지의 수위가 낮게 제한되기 때문에 단류식 낙조발전에서 발전되는 낙차가 단류식 창조발전에 비해 작고 발전 시간도 짧아 단류식 낙조발전의 발전량은 단류식 창조발전의 약 12% 수준으로 산정되었다. 따라서 시화호 조력발전소와 같이 호수위가

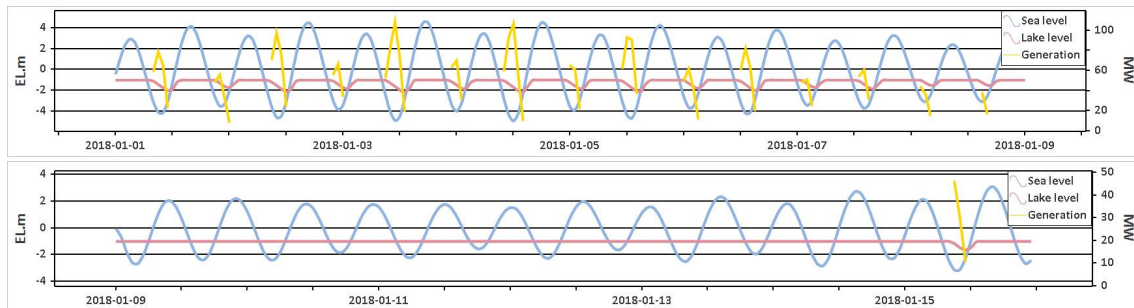


Fig. 7. Ebb generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL. -1 m)

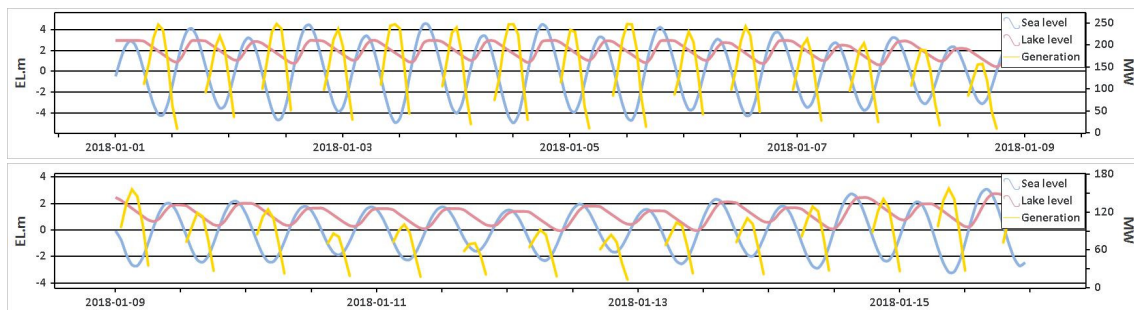


Fig. 8. Ebb generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL. 3 m)

제한되는 환경에서는 단류식 창조발전 방식이 단류식 낙조발전 방식보다 적합하다.

동일한 조위데이터에서 호수위 제한과 초기호수위를 EL, 3m로 완화된 해석결과는 그림 8과 같다. 호수위가 높아짐에 따라 낙조 발전에 활용되는 낙차가 커졌기 때문에 발전량이 20,564MWh로 증가되었다. 단류식 낙조발전에서 호수위 제한이 EL, -1m인 경우와 비교하면 발전량이 약 8.7배 증가하였으며, 단류식 창조발전과 비교하면 약 97%에 해당하는 발전량이다. 이를 통해 호수위의 제한이 없으면 단류식 창조발전과 단류식 낙조발전에서 비슷한 수준의 전력이 생산됨을 확인하였다.

### 3.4.3 복류식 발전

시화호 조력발전소와 동일한 조건에서 복류식 발전의 해석을 수행한 결과 그림 9와 같이 창조발전과 낙조 발전을 번갈아 수행하였으며, 낙조발전 이후 잔여낙차를 활용해 배수를 수행하여 호수위를 추가적으로 낮춰 이후 수행되는 창조발전에서의 낙차를 최대화 하였다. 그러나 창조발전이 호수위 제한에 의해 종료되기 때문에 창조발전 이후 추가적인 충수는 수행되지 않았다. 또한 가용낙차가 작아 발전이

되지 않는 경우 해당 주기에서 배수되어 다음 발전에서의 낙차를 최대화하여 총 발전량을 높이도록 해석되었다.

이 시나리오에서는 낙조발전에서 2,368MWh의 전력이 생산되고 창조발전에서 11,894MWh의 전력이 생산되어 총 14,262MWh의 전력이 생산되었다. 호수위 제한으로 인해 낙조발전의 낙차가 창조발전의 낙차보다 작기 때문에 낙조발전에서의 발전량은 창조발전에서의 발전량의 20% 수준이며, 복류식 발전의 총 발전량은 단류식 창조발전의 70% 수준이다.

복류식 발전에서 호수위 제한을 EL, 3m로 완화한 경우에서 창조발전은 발전정지 낙차에 의해 종료되기 때문에 창조발전 직후 잔여낙차를 활용해 추가적으로 호수위를 높이기 위해 충수가 수행되었다. 이 시나리오에서는 낙조발전에서 9,405MWh의 전력이 생산되고 창조발전에서 8,105MWh의 전력이 생산되어 총 17,510MWh의 전력이 생산되었다. 호수위 제한이 완화되면서 낙조발전에서는 발전량이 4배 증가하고 창조발전에서는 32% 감소하여 복류식 발전의 총 발전량은 23% 증가하였다. 이는 단류식 창조발전의 83%에 해당하는 발전량이다.

앞선 복류식 발전 해석은 호수위 제한이 EL, -1m인 단류식 창조발전에 최적화된 시화호 조력발전소의 설비를 창

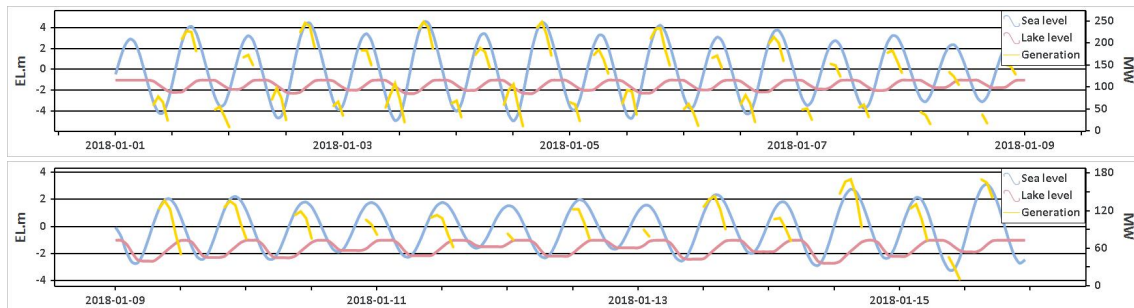


Fig. 9. Double-effect generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL, -1 m)

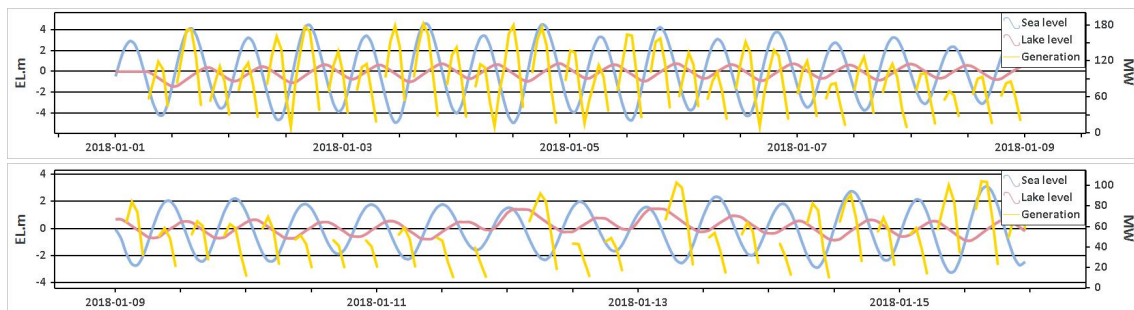


Fig. 10. Double-effect generation simulation (2018.01.01~15, lake level limitation EL, 3 m)

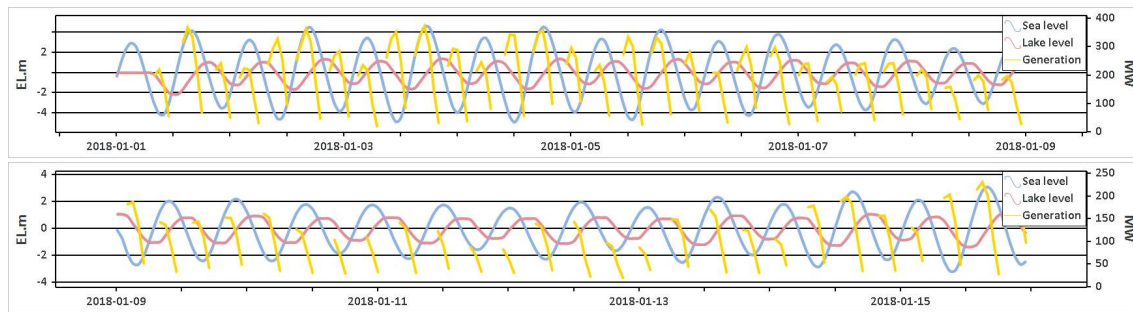


Fig. 11. Double-effect generation simulation with double capacity (2018.01.01~15, lake level limitation EL, 3 m)

조발전과 낙조발전에 각각 적용하여 수행한 것이므로 복류식 발전에서 호수위 제한이 완화된 경우에는 발전설비를 확대하여 총 발전량을 증가시킬 수 있다. 발전설비를 기존보다 2배로 증가시켜 복류식 발전 해석을 수행한 결과 그림 11과 같이 낙조발전에서는 75% 증가한 16,455MWh의 전력이 생산되고 창조발전에서는 94% 증가한 15,701MWh의 전력이 생산되어 총 발전량은 84% 증가한 32,156MWh로 산정되었다. 이는 단류식 창조발전보다 52% 증가한 발전량이다. 이를 통해 호수위 제한이 적은 경우에는 낙조발전과 창조발전을 모두 활용할 수 있는 복류식 발전 방식이 단류식 발전 방식보다 적합한 것을 확인하였다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 범용 조력발전 최적운영 알고리즘을 개발하기 위해 K-TOP의 단류식 창조발전 알고리즘을 바탕으로 단류식 낙조발전 및 복류식 발전 알고리즘을 개발하였다. 단류식 낙조발전 및 복류식 발전의 해석에 필요한 수식 및 제원은 K-TOP에서 사용한 시화호 조력발전소의 자료를 사용하였다.

시화호 조력발전소의 2018년 1월 운영데이터를 기반으로 개발된 알고리즘을 검증하였다. 그 결과 중조기에서는 평균 오차가 3.4%로 예측과 실적이 대체로 일치하는 경향이 나타났고 대조기에는 평균 5.4%의 오차가 발생하였으며 소조기에는 평균 7.9%의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 주로 산정식으로 예측한 성능과 실제 설비 성능의 차이로 인해 발생하는 것이며 발전 손실계수를 세분화하여 줄일 수 있다.

개발된 알고리즘을 바탕으로 발전방식에 따른 조력발전 최적운영 시나리오를 분석하였다. 그 결과 시화호 조력발

전소와 같이 호수위가 제한되는 경우에는 단류식 창조발전 방식이 적합하고 제한이 낮은 경우에는 복류식 발전에서 가장 많은 전력이 생산되는 것을 확인하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원과 한국수자원공사의 지원을 받아 수행된 연구임(해양에너지 융복합 인력양성).

#### References

- [1] 이성훈, 곽희진, 김종득, 이은춘, 김지찬, 전경식, 2015, "Matlab T-tide 를 이용한 조위예측기반의 조력발전량 산정에 관한 연구", 대한전기학회 학술대회 논문집, 1048-1049.
- [2] 김정호, 장태현, 김종득, 이용호, 곽희진, 이성훈, 최재백, 2017, "단류식 창조 조력발전 최적화 운영프로그램(K-TOP)의 개발", 대한전기학회 학술대회 논문집, 1069-1070.
- [3] Bae, Y. H., Kim, K. O., Choi, B. H., 2010, "Lake Sihwa tidal power plant project", Ocean Engineering, 37(5-6), 454-463.
- [4] Baker, A.C., 1991, "Tidal power", Institute of Electrical Engineers, Peter Pergrinus Ltd., London.
- [5] Frau, J. P., 1993, "Tidal energy: promising projects: La Rance, a successful industrial-scale experiment", IEEE Transactions on Energy Conversion, 8(3), 552-558.
- [6] Cornett, A., Cousineau, J., Nistor, I., 2013, "Assessment of hydrodynamic impacts from tidal power lagoons in the Bay of Fundy", International Journal of Marine Energy, 1, 33-54.