

## 발전소 배출수의 재생에너지원으로 활용 방안에 대한 연구 : 유량집적형 소수력발전 기술적용 타당성

최휴창<sup>1</sup> · 이숙경<sup>2</sup> · 김태원<sup>3,†</sup> · 하성원<sup>4</sup> · 서충모<sup>5</sup><sup>1</sup>한국수력원자력 중앙연구원 신재생에너지센터 선임전문원<sup>2</sup>한국수력원자력 중앙연구원 신재생에너지센터 센터장<sup>3</sup>(주)지티이 대표이사<sup>4</sup>(주)지티이 수자원부 차장<sup>5</sup>(주)간트 이사회의장

## Study on the Usage of Discharge Water as a Renewable Energy Source : Feasibility of the Discharge Gathering Type Hydropower

Hyuchang Choi<sup>1</sup>, Sookkyung Lee<sup>2</sup>, Taewon Kim<sup>3,†</sup>, Sungwon Ha<sup>4</sup>, and Chungmo Seo<sup>5</sup><sup>1</sup>Senior Researcher, New & Renewable Energy Center, KHNP Central Research Institute, Daejeon 34101, Korea<sup>2</sup>Center Leader, New & Renewable Energy Center, KHNP Central Research Institute, Daejeon 34101, Korea<sup>3</sup>CEO, GTE Company Limited, Seoul 08390, Korea<sup>4</sup>Deputy General Manager, Department of Water Resources, GTE Company Limited, Seoul 08390, Korea<sup>5</sup>Chairman, Global Environment New Tech., Incheon 22020, Korea

### 요 약

본 연구에서는 3차원 수치모델을 이용하여 원전 배수로 내에서 흐름식 소수력발전 적용 가능성에 대하여 검토하였다. 본 연구에서 적용된 원전 배수로 내 흐름식 소수력발전 시스템은 300kW 소수력 발전시스템 6기(1.8MW, Case 1) 설치하는 것과 200 kW 소수력 발전시스템 12기(2.4MW, Case 2)를 설치하는 두 가지 경우에 대하여 살펴보았으며, 이 가운데 소수력 발전시스템 설치에 따른 원전 가동에 미치는 영향이 작은 안에 대해 연간 발전량과 발전효율을 추정하였다. 소수력 발전시스템 설치에 따른 원전 가동에 미치는 영향은 발전시스템 설치 시 상부 배수구 쪽에 나타나는 수위 변화를 이용하였다. 수치해석 결과 Case 1은 배수로 내 수위가 약 1.1 m 정도, Case 2는 약 0.4 m 정도 상승되는 것으로 모의되었다. 따라서 배수 영향이 원자력 발전소 운전에 미치는 영향을 최소화 할 수 있는 Case 2를 소수력 발전시스템 설치 안으로 선정하였다. Case 2 설치 시 배치된 각각의 발전기로 23.8~27.3 m<sup>3</sup>/s(평균 26.5 m<sup>3</sup>/s)의 유량이 유입되었으며, 출구부에서 유속은 입구부보다 평균 2.4배 높은 2.88~3.32 m/s(평균 3.23 m/s)로 모의되었다. 이와 같은 결과로부터 추정된 발전량은 총 1,078 kW이었으며, 연간 발전량은 약 9,443 MWh에 이를 것으로 검토되었다.

**Abstract** – In this study, the applicability of the discharge gathering type hydropower generation system in the nuclear power plant drainage channel was examined using the 3D numerical model Flow-3D. We reviewed two types of the hydropower generation system. Case 1 is to install 6 units of 300 kW(1.8 MW) and Case 2 is to install 12 units of 200 kW(2.4 MW). As a result of numerical analysis, it was simulated that the water level in discharge channel in Case 1 and Case 2 was increased by 1.1 m and 0.4 m, respectively. Therefore, Case 2 was selected to minimize the backwater effect because of the rise in the water level for the operation of the nuclear power plant. The discharge water of 23.8 to 27.3 m<sup>3</sup>/s(average 26.5 m<sup>3</sup>/s) was flowed into each generator. The velocity at the exit was simulated to be 2.88 to 3.32 m/s(average 3.23 m/s), it was 2.4 times higher than the inlet. From these results, the calculated total power generation amount was 1,078 kW and the annual power generation was estimated to reach approximately 9,443MWh.

**Keywords:** Discharge gathering type(유량집적형), Hydropower system(소수력발전 시스템), Flow-3D(수치해석), Discharge channel(배수로), Annual energy production(연간발전량)

---

<sup>†</sup>Corresponding author: hydrokim@naver.com

## 1. 서 론

소수력발전은 일반적으로 설비용량이 10,000 kW 미만 수력발전으로 위치에너지를 전기에너지로 변환하여 전력을 생산하는 방식으로 에너지 밀도가 높아 유용한 자원으로 평가되며, 재생에너지원 뿐만 아니라 친환경 에너지원으로 이용하고자 하는 관심이 매우 크다. 1980년대 이후 국내에서 소수력 자원조사, 수차개발 등 핵심기술 개발을 위해 노력하였고, 국외에서도 소수력발전은 여러 나라에서 다양하게 운영되고 있으며 기술개발이 이미 확보되었고 시스템의 자동화·표준화 등을 통해 경제성이 있음을 보여주고 있다(KISTI [2003]). 최근 온실가스 감축을 위한 재생에너지 필요성이 대두되고 효과적인 수자원 활용 측면에서 소수력 발전에 대한 관심이 커지고 있다. 하지만 소수력발전은 부존 자원량에 비해 경제성이 낮은 것으로 평가되어 개발이 미진하였으나, 최근에는 지역에너지 사업과 연계하여 소수력 개발 자원 조사, 전력판매단가 보장, 발전기 국산화 및 보급 확대정책으로 여건이 호전되었다. 또한 기존 시설물인 농업용 댐, 하수종말처리장, 수도사업장의 용수로, 냉각탑의 순환수, 양어장 방류수, 중·소규모댐 방출수 등을 이용하는 다양한 소수력발전 기술개발에 대해 노력하고 있다(Cheon *et al.*[2017]; Hwang and Choi[2013]; Jeong and Lee[2016]; Lee and Park[2005]; Park and Kim[2017]).

국내 발전소에서는 해수를 냉각수로 이용하고 있는데 100만 kW 급 발전소 1기의 해수 사용량은 약 50~60톤/sec에 이르는 것으로 보고되고 있으며(CNI[2012]), 직접순환방식(Once-through system)의 냉각수 순환계통 시스템으로 배출되는 냉각수 유속이 일정하기 때문에 이를 활용한 소수력발전 가능성이 높을 것으로 판단하였다. 발전소 방류수 유속은 배수로 구조(체적, 단면적 등)에 따른 차이는 있지만 일반적으로 0.5~2 m/s 범위를 나타낸다(KEI[2013]). 방류수 유속이 2 m/s인 대형 화력발전소는 약 3,000 kW 이상의 수력 에너지를 보유하고 있는 것으로 예상됨에 따라 배수로 내 소수력발전 적용 방안에 대해 다양한 검토가 되었다(Cho *et al.*[2006]; Kang *et al.*[2005]; Kim and Kang[2008]; Cho *et al.*[2011]). 지구온난화에 대한 우려와 함께 CO<sub>2</sub> 배출량 저감 그리고 신재생에너지 의무할당제(RPS) 시행에 따른 적극적 대응 방안 중 하나로 발전소 방류수를 활용 방안에 대한 관심이 높아졌다. 배수로 소수력발전 도입에

관한 연구는 대부분 화력발전소와 LNG발전소를 대상으로 수행되었다. MOCIE[2004]의 연구결과 배수로에 소수력발전을 적용하였을 경우 경제성이 있는 것으로 설명하였다. 소수력 발전시스템 적용으로 발전소 계통에 미치는 영향에 대한 연구도 수행되었다. Cho *et al.*[2006]와 Kim and Kang[2008]은 수치모델 실험을 통해 화력발전소 배수로에 흐름식 소수력 발전시스템을 적용하더라도 내부 계통에 영향은 크지 않다고 설명하였다. 이러한 노력의 결과로 현재 국내 다수의 발전소에서는 냉각해수 방류수를 활용해 다수의 소수력 발전소가 상업운전 중에 있으며(Table 1), 추가적으로 발전소 배수로 내 소수력 발전시스템 적용 방안에 대해 검토되고 있다.

국내 원자력발전소(이하 원전)는 설비용량이 화력발전소 보다 커서 많은 양의 해수를 냉각수로 이용한다. 원전에서 연간 냉각수로 이용 후 배출되는 방류수의 양은 연간 227.2억톤으로 전체 화력발전소에서 배출되는 양인 198억톤 보다 많다(KEI[2013]). 반면 방류수가 배출되는 배수로 폭은 화력발전소에 비해 매우 넓기 때문에 방류수 유속이 약 1.0 m/sec 내외로 화력발전소에 비해 작은 유속을 보인다. 발전소 배수로 내 소수력 발전시스템이 경제성을 갖기 위해서는 일반적으로 배수로 내 유속이 2.0 m/sec 이상 되어야 한다고 보고되고 있다. 이와 같은 이유로 원전 배수로 내 소수력 발전시스템 적용은 경제성이 낮은 것으로 판단하고 있다. 그러나 최근 해양 조류발전 기술 발전과 함께 저낙차 조건에서도 안정적인 전력 생산과 효율성을 유지할 수 있는 다양한 소수력발전 기술이 개발되고 있어 원전 배수로 내 소수력 발전 가능성도 다시 높아졌다. 따라서 본 연구에서는 유량과 유속(운동에너지)만을 이용하여 전기에너지를 생산하는 흐름식 조류발전이 가능하도록 설계된 유량집적형 소수력발전 장치를 적용하였을 경우, 3차원 수치모형인 FLOW-3D를 이용하여 원전 배수로 내 적용 가능성에 대해 검토하였고 이를 통해 연간 발전량을 추정하여 제시하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 대상지역 선정

원전 배출수를 활용한 소수력발전은 계통에 미치는 영향을 고려하여 흐름식발전 적용 방안에 대해 검토하였다. 본 연구에서는 흐름식 소수력발전 장치 설치가 적합한 배수로를 대상으로 유속을 관

Table 1. Power generation of small hydro power generation plant at power plant

Sites	Facility Capacity (kW)	Power Generation (MWh)			
		'15	'16	'17	'18
Yeongheung	12.6	40,333	42,852	44,232	34,599
Samchenpo	3,000	32,268	31,202	30,341	28,379
Shin-Boryeong	5,000	-	957	12,127	13,931
Boryeong	7,500	19,416	19,482	19,106	16,311
Taeon	2,200	4,439	3,601	3,445	3,378
Samchuck	3,332	-	-	3,074	10,987
Namjeju	90	49	21	7	40
Dangjin	5,000	32,335	24,678	23,472	24,617

\*Data from EPSIS(Electric Power Statistics Information System)

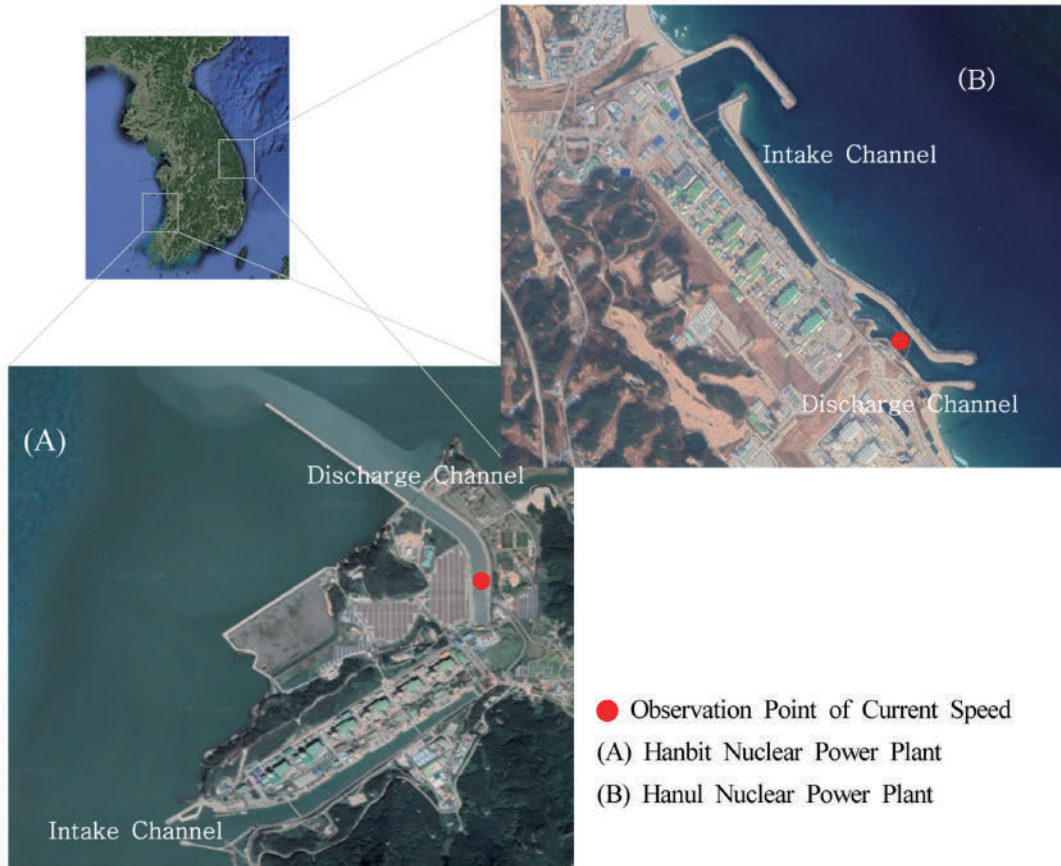


Fig. 1. Study sites for small scale hydropower generation system at nuclear power plant (NPP).

측하였다(Fig. 1). 배수로 내 유속조사는 Seaguard RCM(Aanderaa, Norway)을 배수로 표층 수심 1.0 m에 계류하여 관측하였고, 이를 바탕으로 소수력발전 설치 대상 후보지를 선택하였다.

2.2 수치모델

Flow-3D는 Flow Science, Inc.(USA)에서 개발한 3차원 범용 전산유체역학 프로그램이다. 이모형에서 사용하는 지배방정식은 질량의 sink/source가 없는 비압축성 유체의 흐름을 해석하기 위한 직교좌표계(x, y, z)에서 다음과 같은 RANS(Reynolds Averaged Navier-Stokes) 방정식이다(Flow Science[2019]).

$$\frac{\partial(A_i U_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{1}{V_f} A_j U_j \frac{\partial U_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_i} + F_i \tag{2}$$

여기서, A는 계산격자에서 각 방향의 유체가 흐를 수 있는 면적의 점유율, U<sub>i</sub>는 x<sub>i</sub>방향의 유속, t는 시간, V<sub>f</sub>는 계산격자의 체적 중 유체가 차지하는 점유율, ρ는 물의 밀도, P는 압력, F<sub>i</sub>는 중력이다.

격자계(grid system)의 구성 시 격자망(mesh)과 지형(geometry)은 독립적으로 입력된다. Flow-3D 모형은 유한차분법(Finite Difference Method) 기반으로 지형의 경계부분을 정확히 재현하는 데는 한계가 있다. 이에 Fig. 2와 같이 FAVOR(Fractional Area/Volume Obstacle Representation) 기법을 도입하여 지형의 육면체 격자망에 구조물, 벽체 등의 지형 정보가 포함되며, 경계부분을 최대한 정확히 재현

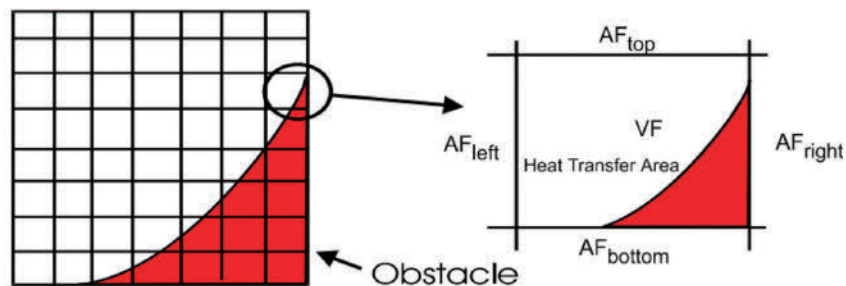


Fig. 2. FAVOR method.

**Table 2.** Roughness coefficient and height of structure (Chow[1959])

Type	Roughness Coefficient ( $n$ )	Roughness Height ( $k_s$ )	Remark
Drainage structure	0.013	0.0014	Concrete
Submarine topography	0.030	0.2072	Natural bed

할 수 있도록 하는 기법이다. 제트, 파랑 등과 같은 자유수면 운동의 기술은 움직이는 격자를 사용하는 라그랑지안(Lagrangian) 방법보다 고정 오일러리안(Eulerian) 방법을 사용하는 VOF(Volume of Fluid) 방법이 일반적이다. Flow-3D 모형에서 사용하는 VOF 방법은 정확한 압력 및 운동학적 경계조건을 적용하고 있으며, 유한 차분식 경계면의 Smearing을 방지하지 위해 특별 수치기법을 사용함으로써 두 유체(유체와 공기일 경우는 보통 자유수면으로 가정함) 사이의 운동을 기술할 수 있는 수치기법이다(Flow Science[2019]).

본 연구에서 난류모형은 RNG(ReNormalized Group)  $k-\epsilon$  모형을 이용하였고, 벽 전단(wall shear) 경계조건은 벽면에서 마찰력에 의해 흐름이 존재하지 않는 무활(No-slip)조건을 이용하였다.

구조물의 재료에 해당하는 조도계수(roughness coefficient)와 조고(roughness height)는 Table 2와 같다. 이때 조고는 FLOW-3D 모형에서 수로의 거칠기를 나타내는 조도계수 대신 사용하는 매개변수로 Christensen[1984]이 제시한 식 (1)을 사용하여 환산하였다. 여기서,  $n$ 은 조도계수,  $g$ 는 중력가속도( $m/s^2$ ),  $k_s$ 는 조고(m)를 나타내며, 수치모델에 사용된 해수 밀도, 점성 및 중력가속도는 각각  $1,030 \text{ kg/m}^3$ ,  $0.001 \text{ Pa/s}$  및  $9.81 \text{ m/s}^2$ 를 적용하였다.

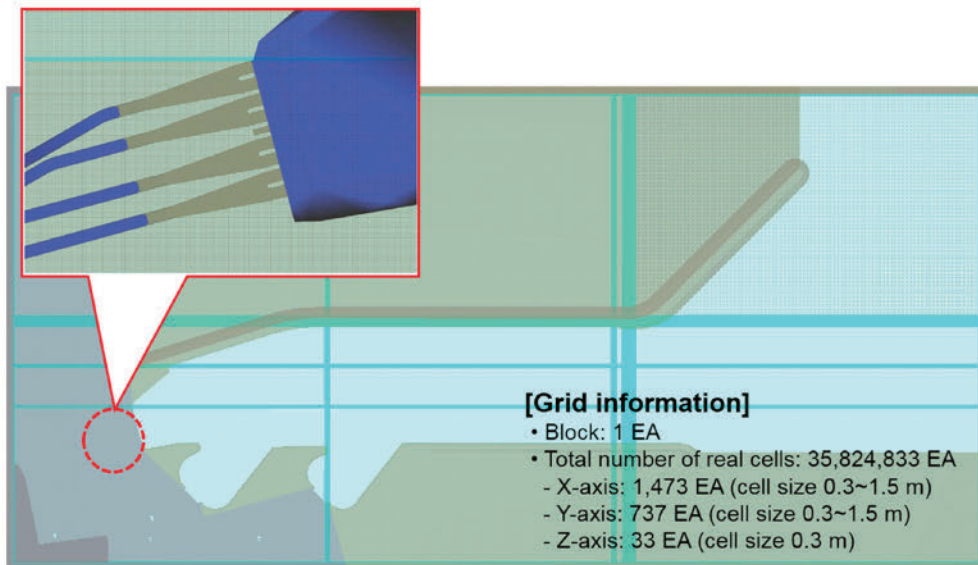
$$n = \frac{k_s^{1/6}}{8.25\sqrt{g}} = 0.039k_s^{1/6} \tag{3}$$

본 연구에서는 배수로 유속조사를 통해 소수력발전 장치 최적 설치장소로 선정된 대상의 배수시스템을 AutoCAD를 이용해 지형, 구조물 형상을 3차원으로 구축하여 수치모델 입력 자료로 활용하

였다. 수치모델 계산영역은 선택된 대상지역의 배수관로(culvert), 배수구조물(discharge structure), 배수로(discharge channel) 및 외해(sea) 구간을 포함하였으며, 소수력 발전시스템 설치 시 나타날 수 있는 배수로 내 수위변화를 통해 발전소 운영에 미치는 영향을 살펴보았다. 그리고 경계범위는  $x$  방향으로 970 m,  $y$  방향으로 468 m에서 수치모델을 위한 격자망은 구조물의 규모가 작고 흐름이 복잡한 영역은 0.3 m 크기의 조밀 격자를 적용하였고, 배수로와 같이 구조물이 없고 흐름이 안정적인 영역은 1.5 m 크기의 성긴 격자를 적용하였다(Fig. 3).

경계조건은 배수관로(상류)에 한울원전의 냉각해수 사용량  $318.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 외해(하류)에 상대적으로 작은 유효낙차가 형성시키는 고조위(high water level) EL.(+) $0.298 \text{ m}$ 를 적용하였다.

원전 배수로 내 소수력발전 방식은 유량 집적형(몰이형, discharge gathering type)의 소수력 발전장치를 적용하는 방안을 검토하였다(Fig. 4). 유량 집적형 장치는 유입부 면적은  $30 \text{ m}^2$ (가로 6 m, 세로 5 m)이며, 유출부는  $9.1 \text{ m}^2$  ( $\pi r^2 = \pi \times 1.7^2$ )으로 유수단면적 축소로 인해 유속을 증가시키는 방식이다. 이와 같은 장치는 수차, 발전기 동체 그리고 유량물이 프레임 등 설비 일체를 제작한 후 배수로에 적합하게 설치할 수 있는 장점이 있다. 본 연구에서는 배수로 내 300 kW 발전기 6기(총 1.8 MW, Case 1)와 200 kW 발전기 12기(2.4 MW, Case 2)를 병렬 연결하여 설치하는 2가지 안에 대하여 검토하였다. 발전용량 산정은 수치모델 결과로 나타난 발전기 입구로 유입되는 유량과 출구부 단면의 평균 유속을 구하였으며, 발전량은 식 (2)를 이용하여 산정하였다. 여기서  $P$ 는 발전량(kW),  $Q$ 는



**Fig. 3.** Nested domain of grid cell resolution bathymetry and boundaries at study site.

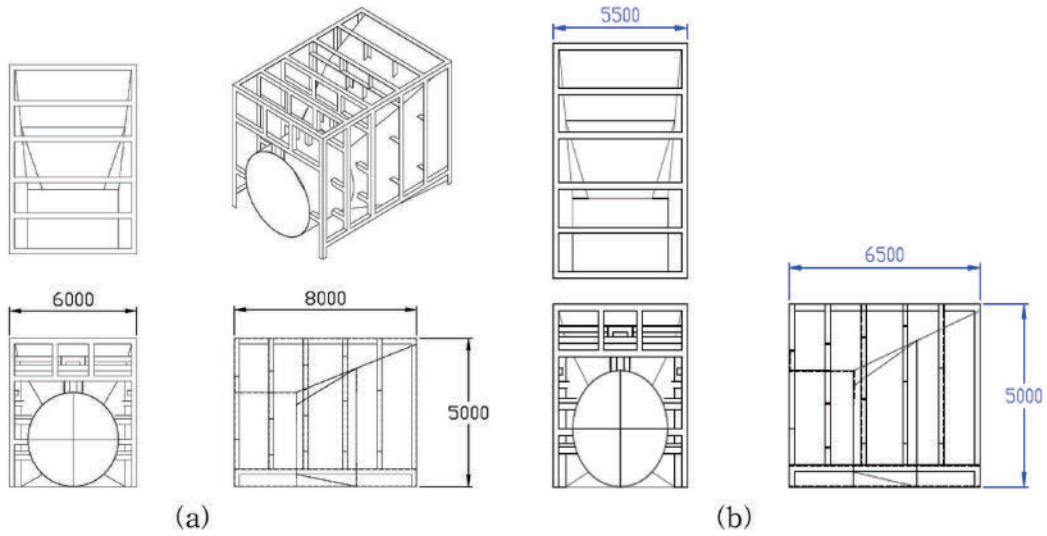


Fig. 4. Schematic diagram of small hydropower generation system (water gathering type) in this study (a: 300 kW, b: 200 kW).

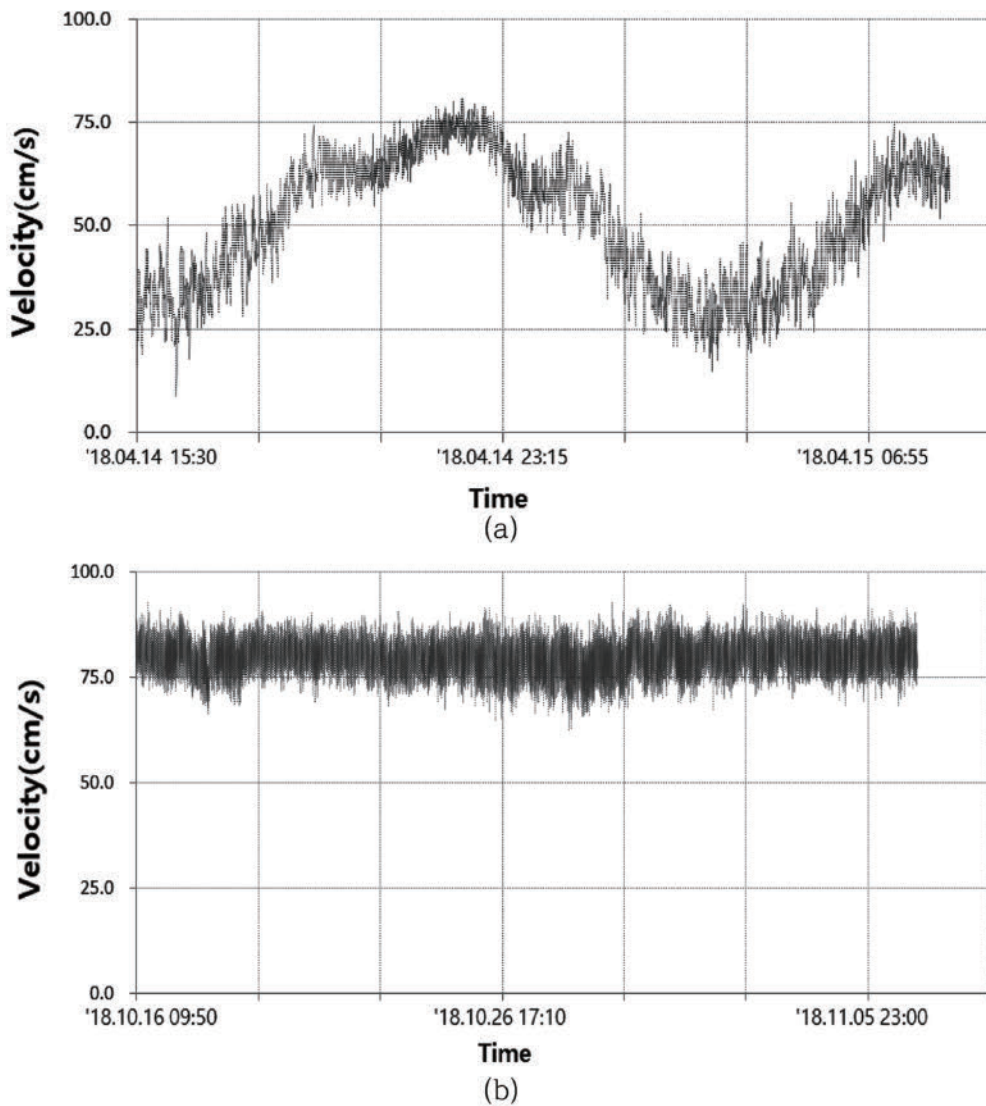


Fig. 5. Temporal variation of current speed at each discharge channel (a: Hanbit, b: Hanul).

유량( $m^3/s$ ),  $V$ 는 소수력 발전기 출구부 단면 평균 유속( $m/s$ )이며  $\eta$ 는 발전효율을 의미한다. 발전효율은 유량 집적형 소수력 발전기 발전 효율(0.65)을 이용하였다.

$$P = \frac{1}{2} Q V^2 \eta \tag{4}$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 대상지역 선정

배수로 내 소수력 발전장치 운영을 위해서는 배수로의 구조적 특성이 소수력 발전장치 설치 시 접근성이 용이하고 시공성이 양호하여야 한다. 이러한 조건을 바탕으로 검토한 결과 본 연구에서는 4곳의 원전 중 한빛과 한울원전 배수로를 대상으로 설치 가능성을 검토하였다. 두 원전 모두 직접순환방식의 냉각방식을 이용하여 해수를 취·배수하고 있으며 각각 가압경수로(PWR) 6개 호기가 가동 중에 있다. 설계 냉각 해수량은 한빛원전이 총  $354.6 m^3/s$ (1호기 당 평균  $59.1 m^3/s$ ), 한울원전은 총  $342.8 m^3/s$ (1호기 당 평균  $57.1 m^3/s$ )이며, 배수로 길이는 각각 약 1,200 m와 약 700 m에 이른다(Fig. 1). 한빛원전 인근 해역의 평균해면(M.S.L.)은 EL.(-)0.130 m, 최고고조위(H.H.W.L.)는 EL.(+)4.366 m, 최저저조위(L.L.W.L.)는 EL.(-)3.764 m로 조차(tidal range)가 큰 지역이며, 이에 비해 한울 원전 인근 해역의 평균해면(M.S.L.)은 EL.(+)0.140 m, 최고고조위(H.H.W.L.)

는 EL.(+)0.922 m, 최저저조위(L.L.W.L.)는 EL.(-)0.328 m으로 조차가 크지 않은 곳이다.

조사기간 동안 배수로 내 고정점에서 관측된 유속 변화를 살펴 보면 한빛원전에서 8.9~80.9 cm/s 범위로 평균 50.6 cm/s 이었고, 한울원전에서는 62.4~93.0 cm/s 범위로 평균 79.7 cm/s 이었다. 한빛원전 배수로에서 유속은 조석 변화에 대한 영향이 컸지만, 한울원전 배수로에서는 조석 변화에 의한 영향은 크지 않았다(Fig. 5). 배수로 내 소수력 발전시스템은 유량도 중요하지만 안정적인 흐름이 중요하기 때문에 본 연구에서는 한울 원전 배수로를 소수력 발전설비 설치 대상지역으로 선정하였다.

#### 3.2 배수시스템 분석

한울본부 배수시스템 구조분석 결과는 아래 그림과 같다. 일반적으로 발전소 냉각수 계통에서 사이펀 흐름을 유지시키기 위해 시공되는 Seal pit 등의 구조물이 배수시스템 상에서는 보이지 않았으며, 1호기와 2호기 배출구 말단부를 제외하면 전반적으로 완만한 경사도를 유지하는 구조적인 특성을 보였다(Fig. 6).

#### 3.3 수치모델 실험

한울본부 배수로 내 소수력 발전시스템 설치에 따른 변화를 파악하기 위해 FLOW-3D를 이용하여 현재 배수로 내 유속분포 등

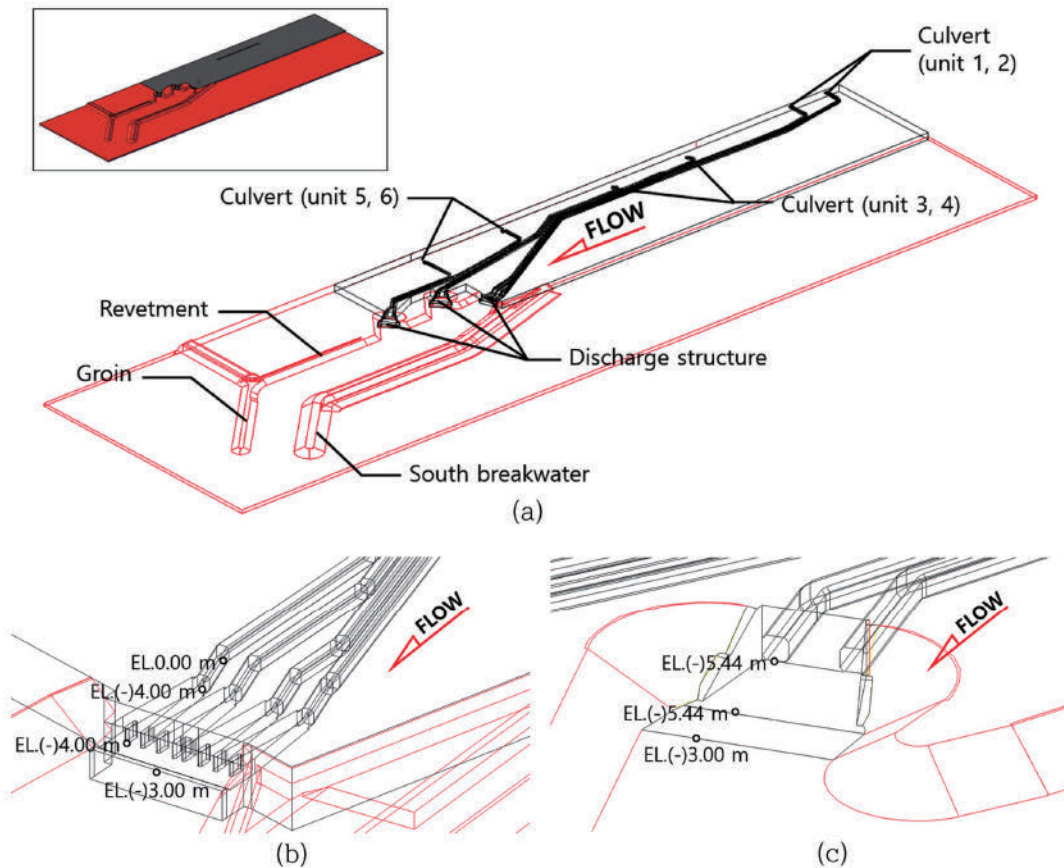


Fig. 6. Structural analysis of the discharge channel system (a) and outlet structure at terminal region (b: unit 1, 2, c: unit 3~6).

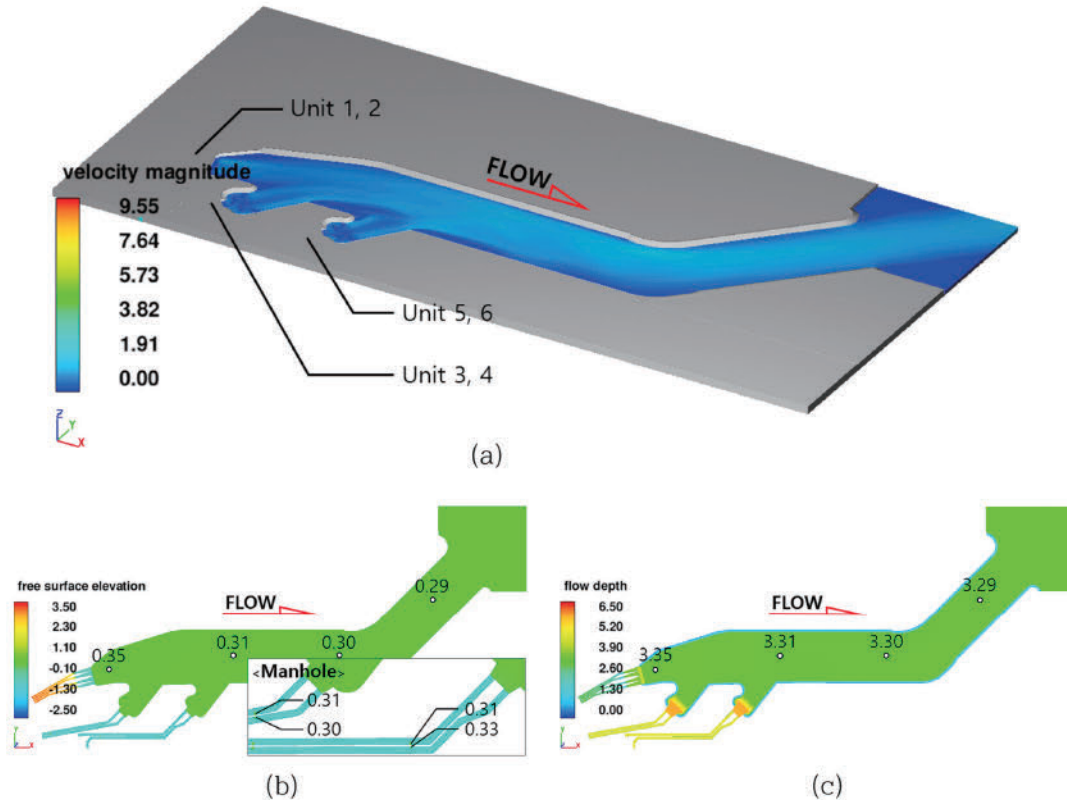


Fig. 7. Flow characteristics at the surface layer in discharge channel without small hydro-power generation system (a: current speed (m/s), b: free surface elevation (m), c: depth (m)).

의 특성을 분석하였다. 배수로 내 유속분포는 전체 영역에서 약 0.9~1.2 m/s로 현장조사 결과와 유사하였고, 수위는 약 EL.(+)0.4 m 이하로 분포되었다. 배수로 내 흐름은 배수구 주변에서 통수단면적의 급격히 확대되어 국부적으로 와류(vortex)가 발생하지만 전반적으로 배수시스템 내 흐름은 균일하였고 외해 측으로 방류되는 흐름은 안정적으로 나타났다(Fig. 7).

1, 2호기 배수관로는 대부분 0%의 완만한 경사를 가지나, 말단부에 57.14%의 급경사가 있어  $Fr > 1$ 인 흐름으로 관성력의 영향이 지배적인 상류(supercritical flow)가 일부 형성되었다. 여기서,  $Fr$ 은  $V/\sqrt{gy}$ ,  $y$ 는 수심이다. 즉 고유속으로 하류의 영향이 상류 흐름에 영향을 주지 않는 반면 3, 4호기와 5, 6호기 배수관로는 0~1.54%의 완만한 경사를 가지고 있어  $Fr < 1$ 인 흐름으로 중력의 영향이 지배적인 상류(subcritical flow)와 함께 압력 흐름이 형성되었다. 즉 하류의 흐름 영향이 상류에 영향을 주는 흐름조건이다. 따라서 배수로 내 소수력 발전시스템을 설치하였을 경우 3, 4호기와 5, 6호기의 배출구는 완만한 경사도를 가지고 있기 때문에 소수력 발전시스템 설치에 따른 영향은 배수관로 내 위치한 맨홀의 수위(약 EL.(+)0.4 m) 변화를 통해 검토하였다(Fig. 7b).

### 3.4 소수력 발전시스템에 의한 환경변화

본 연구에서는 한울 원전 배수로 내에 300 kW 발전기 6기(총 1.8 MW, Case 1)와 200 kW 발전기 12기(2.4 MW, Case 2)를 병렬

로 배치하여 설치하는 안에 대하여 검토하였다(Fig. 8). Case 1의 경우 배출구에서 방류되는 총 방류량 318.2 m<sup>3</sup>/s 가운데 발전기 설계용량을 고려하여 240.0 m<sup>3</sup>/s(약 75%)를 소수력 발전에 이용하는 것으로 가정하였고, 발전에 이용되지 않은 78.2 m<sup>3</sup>/s는 소수력 발전시스템 구조물을 지탱하기 위해 설치되는 4 m 높이의 라바댐(rubber dam)을 통해 방류되는 것으로 분석하였다. 반면, Case 2의 경우 배출구에서 방류되는 총 방류량을 모두 이용하는 것으로 가정하여 분석하였다.

300 kW 발전기 6기를 설치할 경우 소수력 발전설비 구조물의 영향과 발전에 이용되지 않은 유량 78.2 m<sup>3</sup>/s가 라바댐을 월류하는 수리적(hydraulic) 특성으로 인해 배수로 상류의 유속은 약 1.2 m/s 이하로 분포하였고 수위는 약 EL.(+)1.5 m 이하로 소수력 발전설비가 없는 조건 대비 약 1.1 m 상승하는 것으로 나타났다. 반면 하류는 소수력 발전기를 통과하는 과정에서 통수단면적이 축소됨에 따라 유속이 빨라져 배수로 내에 약 3.0 m/s 가량의 빠른 유속이 분포하였으나 수위는 EL.(+)0.3 m로 거의 변화되지 않았다(Fig. 9).

200 kW급 소수력 발전기 12기를 설치하였을 경우 상류 측 유속 분포는 Case 1과 유사하였지만 수위는 약 EL.(+)0.8 m 이하로 분포되고 있으며, 소수력 발전설비가 없는 조건 대비 약 0.4 m 상승하는 것으로 나타났다. 하류쪽 배수로 내 유속은 약 2.0 m/s 이하였고 약 EL.(+)0.3 m 수위 분포를 보였다(Fig. 10).



Fig. 8. Schematic diagram of the small hydropower generation in discharge channel (a: Case 1[1.8 MW], b: Case 2[2.4 MW]).

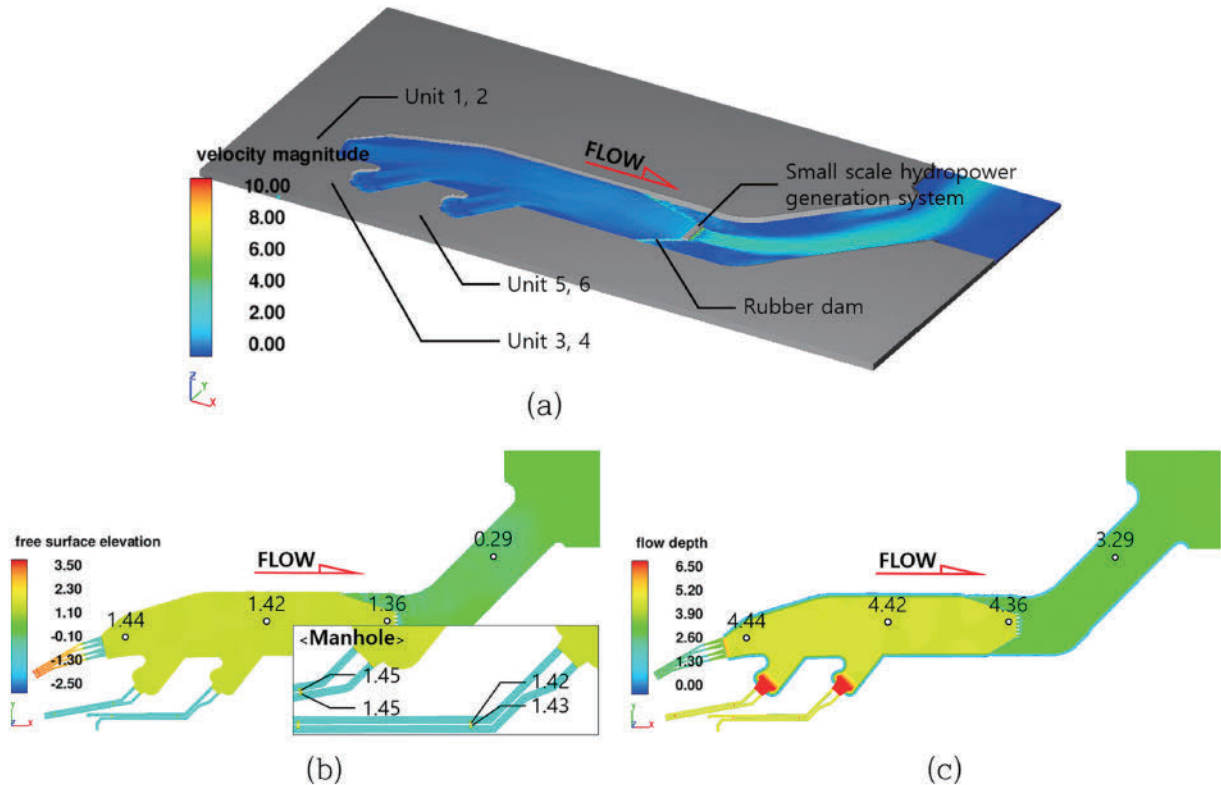


Fig. 9. Flow characteristics at the surface layer in Case 1 (a: current speed (m/s), b: free surface elevation (m), c: depth (m)).

3.5 발전량 산정

본 연구에서 소수력 발전시스템 설치에 따른 발전량은 발전소 가동에 영향이 적은 Case 2에 대해서만 분석하였고, 수치모델을 통해 발전기 출구부로 유입되는 유량 그리고 발전기 입구부와 후단부의 유속을 계산하여 발전량을 추정하였다.

200 kW 소수력 발전기 12기를 설치하였을 경우 발전기로 유입되는 유량은 23.8~27.3 m³/s 범위로 평균 26.5 m³/s가 유입하였다 (Table 3). 소수력 발전시스템 설치 전 배수로 유속은 약 1 m/s 안팎의 분포를 보였지만, 소수력 발전시스템 설치로 발전기 입구부의 유속은 약 1.3 m/s로 증가하였고, 발전기가 설치되는 출구부에서는

입구부보다 약 2.4배 높은 2.88~3.32 m/s(평균 3.23 m/s)로 나타났다(Fig. 11). 이를 통한 추정된 발전량은 호기당 평균 89.9 kW로 총 발전량은 1,078 kW이었으며, 연간 발전용량은 약 9,449 MWh에 이를 것으로 추정된다.

4. 결 론

본 연구에서는 3차원 수치모델인 Flow-3D를 이용하여 원전 배수로 내 소수력 발전시스템 도입 가능성에 대해 검토하였다. 현장에서 측정한 유속자료와 수치모델의 결과를 바탕으로 한울원전 배수



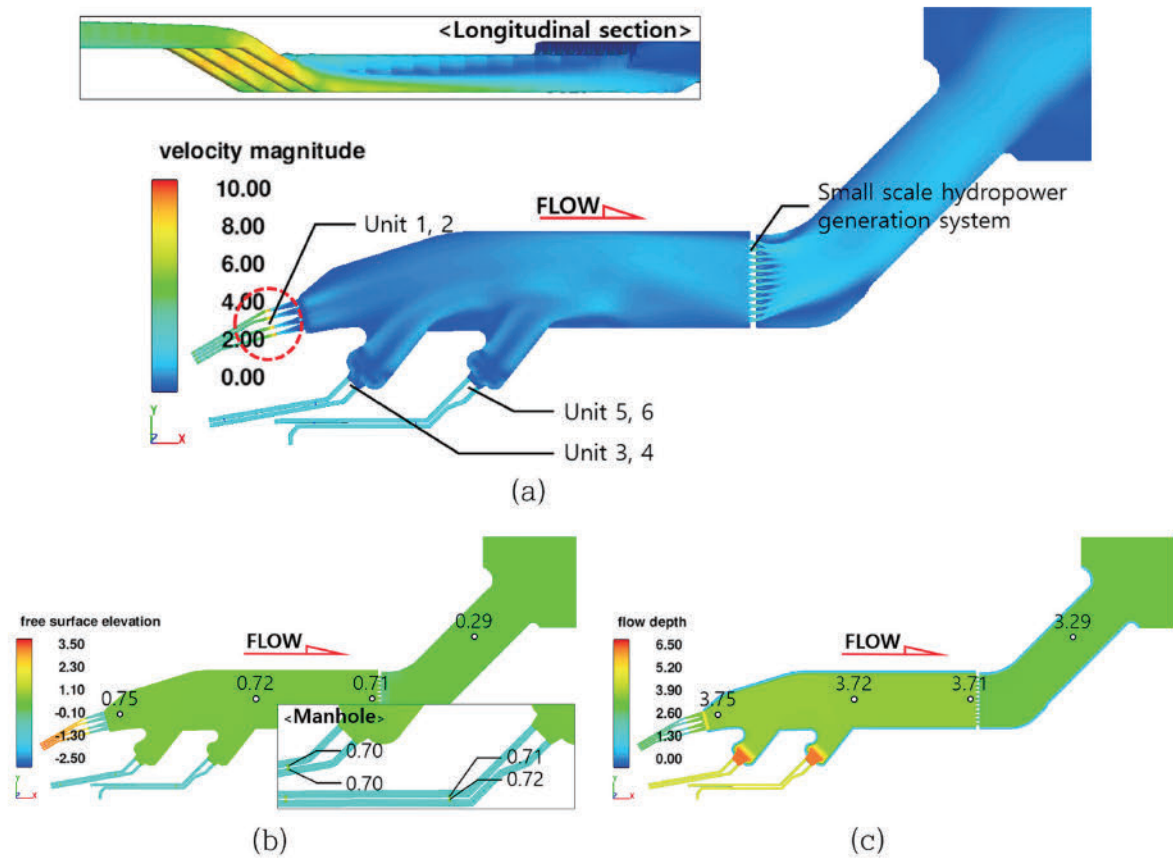


Fig. 10. Flow characteristics at the surface layer in Case 2 (a: current speed (m/s), b: free surface elevation (m), c: depth (m)).

Table 3. Model result of the flow rate at the inlet area of small power generation system

Unit	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10	#11	#12	Total	
Flow rate(m <sup>3</sup> /s)	26.0	27.3	27.3	27.1	27.0	27.1	26.9	26.8	26.7	26.4	25.8	23.8	321.2	
Velocity (m/s)	Inlet	1.31	1.36	1.37	1.36	1.35	1.36	1.35	1.35	1.34	1.32	1.30	1.20	-
	Outlet	3.18	3.32	3.32	3.30	3.29	3.30	3.30	3.23	3.24	3.22	3.14	2.88	-

\*# 1 : left side, #12 : right side

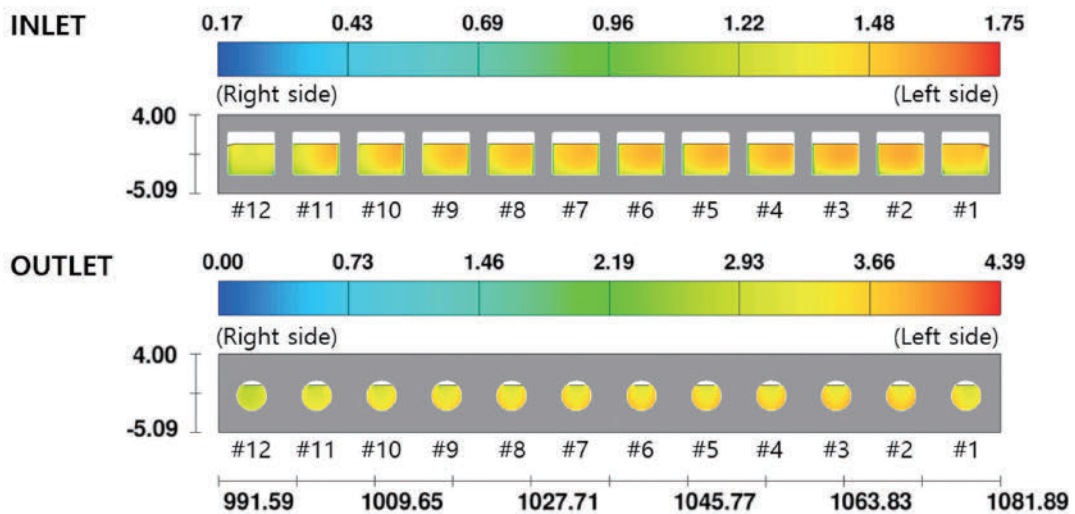


Fig. 11. Flow speed at the inlet(a) and outlet(b) area of small hydro power system (unit: m/s).

로를 대상 지역으로 선정하였고, 배수로 내 설치되는 소수력 발전 시스템은 Case 1(300 kW급 6기(1.8 MW))과 Case 2(200 kW급 12기(2.4 MW)) 설치 방안에 대해 검토하였다.

수치해석 결과 Case 2의 경우 소수력 발전시스템 상류 수위 상승이 0.4 m 이하로 Case 1(1.1 m) 보다 낮아 발전소 순환수계통에 미치는 영향을 작은 것으로 나타났다. 200 kW 소수력 발전기 12기를 설치하였을 경우 발전기로 유입되는 유량은 23.8~27.3 m<sup>3</sup>/s 범위로 평균 26.5 m<sup>3</sup>/s가 유입되었으며, 발전기가 설치되는 출구부 유속은 입구부보다 평균 2.4배 높은 2.88~3.32 m/s(평균 3.23 m/s) 범위를 보였다. 이를 이용해 계산한 발전량은 총 1,078 kW로 연간 약 9,443 MWh에 이를 것으로 검토되었다.

본 연구는 발전소 설계기준에 근거하여 FLOW-3D를 이용하여 소수력발전 적용 가능성에 대해 검토 하였다. 향후 배수로 내 소수력 발전시스템을 도입하기 위해서는 배수로 내 지점 별 상세 유속 분포 조사, 운행조건에 따른 방류량 변화, 조위 특성 변화 등에 대한 현장조사 및 유속을 증가시킬 수 있는 유량집적형 소수력 발전 시스템의 구조 변경에 따른 다양한 수치모의를 통해 최적화된 발전모형 수립, 소수력 발전기의 현장 실증 및 계통 연계방안 그리고 경제성 분석이 선행되어야 할 것이다.

## References

- [1] Cheon, K.H., Noh, J.M., Kim, J.Y. and Kang, M.S., 2017, The Real Time Flow-Variable Small-Hydropower System for Municipal Wastewater Treatment Plant, Magazine of RCR, 12(1), 39-43.
- [2] Cho, H.Y., Jeong, S.T., Kim, J.D. and Kang, K.S., 2006, Prediction of the Flow Pattern Changes using FLOW-3D Model in the Effluent Region of the Samcheonpo Thermal Power Plant (TPP), J. Korean Soc. Coastal and Ocean Eng., 18(4), 338-347.
- [3] Cho, G.Y., Kim, J.D., Chun, S.Y. and Jeong, S.T., 2011, Study on the Tidal Current Hydro Power System at the Outfall of Power Plant, in proc. of KAOSTS Spring Meeting, Busan, Korea, 2102-2105.
- [4] Chow, V.T. 1959, Open-Channel Hydraulics, McGraw Hill Book Company, Inc., New York.
- [5] Christensen, B.A. 1984, Analysis of Partially Filled Circular Storm Sewers, Water for Resource Development: Proceedings of the Conference, ASCE, 163-167.
- [6] CNI(Chung Nam Institute), 2012, Current Status and Application Plan of Cooling Water from Power Plant in ChungNam Province.
- [7] Flow Science. 2019, Flow-3D User's Manual. Los Alamos, NM, USA.
- [8] Hwang, Y.C. and Choi, Y.D., 2013, Construction of Marine Small Hydro Power Plant using Discharge Water of Fish Farm, The KSFJ Journal of Fluid Machinery, 16(5), 11-17.
- [9] Jeong, S.Y. and Lee, K.B., 2016, Flow Characteristics Analysis and Test in the Pelton Turbine for Pico Hydro Power using Surplus Water, J. Koera Academia-Industrial Co. Soc., 17(4), 325-331.
- [10] KEI(Korea Environment Institute), 2013, A Study on Measures to Predict and Mitigate Marine Environmental Impacts of Cooling Water Discharges from Power Plant.
- [11] Kang, K.S., Lee, D.S. and Kim, J.Y., 2005, A Study on Hydro Energy Development of Discharged Cooling Water at the Power Plant, in proc. of KSFJ December Meeting, Changwon, Korea, 813-818.
- [12] Kim, J.Y. and Kang, K.S., 2008, Analysis of Impact on the Circulating Water System due to Installation of Low-head Stream Turbine at the Discharge Channel of the Power Plant, in proc. of KWRA May Meeting, Kyeongju, Korea, 1599-1603.
- [13] KISTI(Korea Institute of Science and Technology Information), 2003, Tech. Trend Report : Technology Trend of Small Scale Hydropower Generation.
- [14] Lee, C.H. and Park, W.S., 2005, Small Hydropower Generation Technology, Journal of the KSME, 45(10), 39-44.
- [15] MOCIE(Ministry of Commerce, Industry and Energy), 2004, A Feasibility Study on the Hydropower Generation System Using Discharged Cooling Water of Thermal Power Plant.
- [16] Park, Y.S. and Kim, K.J., 2017, Performance Evaluation and Economic Analysis on the Integrated Small Power Hydro Power Generation Device Using a Discharged Water of Sewage Treatment Plant, J. Koera Academia-Industrial Co. Soc., 18(9), 486-491.

Received 16 September 2021

Revised 6 October 2021

Accepted 1 November 2021