

## 조류발전 축소모형 시험을 위한 수평형 회류수조의 유동 특성 분석

정세진<sup>1</sup>, 이희범<sup>2</sup>, 문성민<sup>1</sup>, 김흥찬<sup>1</sup>, 서창현<sup>1</sup>, 장인성<sup>1</sup>, 김지훈<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국해양과학기술원, <sup>2</sup>한국수력원자력 중앙연구원

### Flow Characterization of a Horizontal Water Circulating Channel for Testing a Scaled-model Tidal Current Turbine

Sejin Jung<sup>1</sup>, Heebum Lee<sup>2</sup>, Seong Min Moon<sup>1</sup>, Heungchan Kim<sup>1</sup>,  
Chang Hyeon Seo<sup>1</sup>, In Sung Jang<sup>1</sup>, Jihoon Kim<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>Korea Institute of Ocean Science and Technology  
<sup>2</sup>Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.

**요약** 조류발전기는 조류를 이용한 발전 시스템으로 CO<sub>2</sub> 배출로 인한 환경오염과 지구 온난화 문제를 해결할 수 있는 신재생 에너지 중 하나이다. 조류 발전기의 상용화를 위해서는 발전기의 성능예측을 위해 축소모형 시험이 필수로 요구된다. 본 연구에서는 조류 발전기의 축소모형 시험을 위해 수평형 회류수조의 유동 특성을 입자영상유속계를 활용하여 분석하였다. 특히 설정 유속 0.5, 0.75, 1 m/s에서 유속 분포와 난류 강도를 계측하였다. 수평형 특성으로 인해 최대 유속은 관측부의 가장 외곽에, 최저 유속은 단면의 중앙에서 내측에 각각 형성되었다. 난류 강도의 경우 유속이 증가할수록 비례적으로 증가하였으며 내측에서 외측으로 멀어짐에 따라 비례적으로 증가하는 것을 확인하였다. 또한 유동가시화 결과를 통해 수평형 회류수조에서 중앙부 부근과 외측 영역에서 평탄한 유속 구역이 존재함을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 조류 발전기를 비롯한 수중 구조체와 더 나아가 수중에서 무인 로봇 등을 평가하는 시험 설계에 다양하게 활용될 것으로 기대한다.

**Abstract** The tidal current turbine is a power generation system that utilizes tidal currents and is one of the renewable energy sources proposed to solve the problems of environmental pollution and global warming caused by CO<sub>2</sub> emissions. Nevertheless, the commercialization of tidal current turbine generators requires scale model tests to predict the performance. This study measured the flow characteristics of a horizontal circulating water channel using particle image velocimetry (PIV) for the scale model test of a tidal current turbine. In particular, the flow velocity distribution and turbulence intensity were measured at set flow rates of 0.5, 0.75, and 1 m/s. Due to the horizontal shape, the maximum flow speed was at the outer part of the observation, and the minimum flow speed was at the inner part of the cross-section. The turbulence intensity increased as the flow velocity increased and from the inner to the outer edge. The flow visualization results also revealed uniform flow velocity zones near the central and outer regions. These results are expected to be used in designing experiments to assess underwater structures, such as tidal generators and unmanned underwater robots with underwater dynamic performance.

**Keywords** : Circulating Water Channel, Particle Image Velocimetry, Velocity Distribution, Turbulence Intensity, Flow Field

본 논문은 한국수력원자력(주)의 지원과(A18LP08) 2023~2024년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00256122, RS-2023-00243064).

\*Corresponding Author : Jihoon Kim(Korea Institute of Ocean Science and Technology)  
email: jihoonkim@kiost.ac.kr

Received January 8, 2024

Revised March 7, 2024

Accepted March 8, 2024

Published March 31, 2024

## 1. 서론

석유 자원에 대한 높은 의존도와 이에 따른 이산화탄소 배출로 인한 환경오염과 지구 온난화 문제가 전 세계적으로 공론화되면서 재생 가능 에너지에 대한 필요성이 증가하고 있다[1]. 그중 해양 신재생 에너지의 한 종류인 조류력을 이용한 조류 발전기는 유체의 특성만 상이할 뿐, 종래에 상용화 된 풍력 발전기와 원리가 동일하여 연구 내용을 상호 활용할 수 있다[2]. 그 중 조류 발전기의 한 형태인 수평축 발전기는 유향 입사 방향의 수직으로 배치된 블레이드에서 발생하는 양력(lift force)을 이용하여 회전이 되며, 이에 반해 항력(drag force)을 이용하는 수직축 발전기보다 상대적으로 높은 효율을 얻을 수 있어 전 세계적으로 상업적 활용 제고 가치가 높다는 평가를 받고 있다[3].

상기 언급된 조류 발전기의 성능 평가를 위해서는 축소 비율에 따른 수리 모형 시험을 통해 사전 수행하여 발전기의 출력, 유속분포 및 와류(vortex)를 포함한 후류 관찰, 후류의 발생과 발달에 대해 가시화, 더 나아가 발전기 배치에 따른 발전기들의 상호영향에 대해 연구가 필요하다. 모형 시험의 경우 주로 무차원 수인 레이놀즈 수( $Re$ : Reynolds Number)를 기반으로 유동 상사성(flow similarity)을 맞추어 블레이드 근처 유동 특성의 유사성을 확보한다[4]. 하지만 축소 모형으로 레이놀즈 수를 상사 시킬 경우 높은 유속이 요구됨에 따라 오히려 시험 설비의 한계에 직면하게 되며, 이에 따른 조류 발전기 블레이드의 높은 회전속도는 급격하고 과도한 후류 발달에 영향을 줄 수 있기 때문에 시험 결과에 오차를 발생시킨다[5]. 또한 레이놀즈 수를 만족시키더라도 동시에 두 개 이상의 주요 인자(parameter)에 대해 상사를 맞추기 어려우며, 발전기의 출력 시험의 경우 발전기의 크기에 따라 시작 토크(starting torque)가 달라지고 유속에 따라 출력 양상이 변하기 때문에 모형 시험을 통한 분석에 어려움이 있다[6].

따라서 축척 효과(scale effect)가 비교적 적은 시험 환경을 구현하기 위해서는 가급적 크기가 큰 대형 수조를 통해 모형 시험의 스케일을 확보하는 것이 요구된다. 특히 대형 회류수조를 이용할 경우 지속적인 유동 발생으로 장시간 반복 시험이 가능하며 대형 수조의 중앙 부분은 수조 벽면의 경계층(boundary layer)의 영향이 낮으므로 시험의 재현성과 실규모 환경 대응 예측 등에 뛰어난 이점이 있다. 하지만 회류수조의 특성상 자유수면의 영향을 받으며 유체의 반복적 순환을 위한 곡선 형상

존재로 인해 시험부에서의 유속 불균일이 존재하게 된다. 특히 조류 발전기의 성능 시험의 경우 시계열에 따른 유속의 입사각 및 균일성이 출력에 영향을 미치며, 이로 인해 와유기 진동(vortex induced vibration)등이 발생하여 발전기의 성능 곡선에 영향을 주고 구조적인 수명을 단축시킬 우려가 있다. 따라서 정확하고 신뢰성 있는 시험을 위해서는 회류수조의 유동 특성을 이해하고 이에 맞는 시험 설계 및 분석이 반드시 필요하다.

따라서 본 연구에서는 시험 설비의 특성을 파악하여 향후 수행할 조류 발전기의 실험 설계(DOE, Design of Experiment)에 활용하고자 한다. 특히 한국해양과학기술원에서 보유하고 있는 수평 대향형 대형 회류수조의 유동 특성을 파악하기 위해 유동가시화 기법을 사용하고자 하였으며, 실험적 접근 방법으로 입사 영상 유속계(PIV, Particle Image Velocimetry)를 활용하여 유속의 분포를 가시화 하였다. 특히 회류수조의 설정 유속을 변경하며 시험 단면의 전면부, 중앙부, 후면부에서의 유동의 단면을 측정하였으며 이때의 유속 분포(velocity distribution)와 난류 강도(turbulence intensity)를 각각 계측 및 비교하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 시험 장비 및 조건

#### 2.1.1 회류수조

Fig. 1(a)는 수평형 회류수조의 평면도를 나타낸다. 유동의 방향은  $x$ +방향이며 수중에 잠긴 임펠러(impeller)의 회전속도에 의해 유체는 최대 1.76 m/s 까지 가속되고 제어된다. 회류수조 내에는 유속을 가속 후 회전 및 압력을 변화시키는 가이드 베인(guide vane) 후단에, 유동박리를 방지하고 시험부의 균일한 유동장의 생성을 위하여 내부에 보조장치(honey comb)가 설치되어 있다. 회류수조 시험 단면은 길이(length,  $L$ ), 폭(width,  $W$ ), 깊이(depth,  $D$ )는 각각 20 m, 5 m, 5 m이다. 유동 측정 관측부 길이 방향의 전면부, 중앙부, 후면부에 해당하는  $x/L = 0, 0.5, 1$ 인 구간에서 시행하였다. 각 측정 구간에서의 단면은 Fig. 1(b)와 같다. 해당 구간의 유동 측정은 수중 잠항형 PIV를 이용하여 이루어졌으며 화각의 제한으로 인해 카메라를  $y$  방향으로 0.453 m,  $z$  방향으로 0.237 m씩 이동하며 촬영을 진행하였고  $y$  방향으로는 6 구간,  $z$  방향으로로는 5 구간 촬영하여 총 측정 영역은 가로 2.716 m, 세로 1.186 m이다.

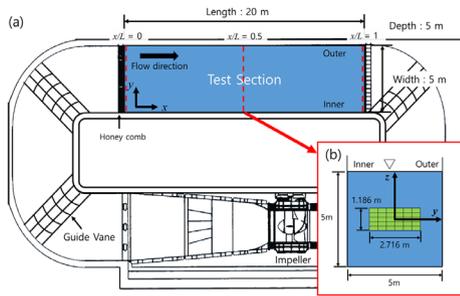


Fig. 1. Schematic of circulating channel  
(a) Plan of circulating channel  
(b) Cross-section of test section

### 2.1.2 유속 조건

해당 시험에서의 유속은 0.5, 0.75, 1 m/s이며 해당하는 레이놀즈 수( $Re$ )는  $3.0 \times 10^7$ ,  $4.52 \times 10^7$ ,  $6 \times 10^7$ 이며 해당 식은 Eq. (1)과 같다.

$$Re = \frac{U_{mean} D_H}{\nu} \quad (1)$$

Where,  $U_{mean}$  denotes mean velocity,  $D_H$  denotes hydraulic diameter,  $\nu$  denotes Kinematic viscosity

### 2.1.3 PIV 준비

PIV 측정은 Fig. 2와 같이 수중에서 카메라 촬영과 레이저 조사가 동시에 가능한 수중 잠항형 PIV장비를 이용하였다. 카메라와 레이저는 유선형 외피가 부착되어 있어 와류기 진동에 의한 흔들림을 최소화하였다. CCD 카메라(630098, TSI)는 25 MP 해상도에 72 fps의 촬영 속도를 가졌으며, 가시광선의 영향을 배제하기 위해 532 nm 파장만 획득할 수 있는 전용 필터와 원격으로 조리개와 확대 축소를 담당하는 렌즈(NIKKOR 60, 105mm, Nikon)와 원격 조절장치가 각각 장착되어 있다. 레이저는 출력 200 mJ, 파장 532 nm를 갖는 Nd:YAG 타입이며 전용 cylindrical & spherical 렌즈를 통해 두께 2~5 mm 범위를 갖는 레이저 면(laser sheet)을 수중 내에서 조사할 수 있다. 무엇보다도 본 연구에서는 유동에 수직한 평면에서의 3차원 유동 측정을 위하여 두 대의 카메라를 이용한 Stereo PIV 촬영을 진행하였다. 보정판(calibration sheet)을 레이저 면에 맞추어 보정을 진행하였고 카메라의 각도는 보정판과 각각  $44^\circ$ 와  $25^\circ$ 를 이루고 있으며 해당 조건에서의 시야각(FOV: Field Of View)은  $0.453 \text{ m} \times 0.237 \text{ m}$ 이다. PIV에 사용된 입자는 polyamide 재질이며 직경은  $100 \mu\text{m}$ 이고 밀도는  $1,060 \text{ kg/m}^3$ 이다.

PIV 장비는 카메라는 2축으로, 레이저는 3축으로 움직일 수 있는 전용 트래버스(traverse)에 구축하여 시험을 수행하였다.

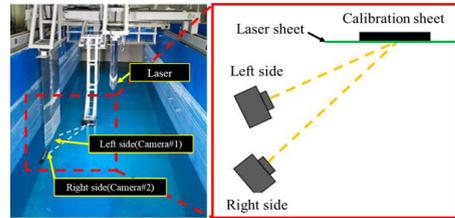


Fig. 2. Experimental and schematic setup for PIV

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 유속 분포

설정 유속에 따른 유속 분포의 비교를 위하여 측정 구간( $x/L = 0, 0.5, 1$ )에서의 유속 분포를 해당 구간에서의 평균 유속(0.5, 0.75, 1 m/s)으로 나누어 무차원화하여 나타내었다(Fig. 3). 최저 유속의 위치는  $y/W = -0.2 \sim -0.1$  부근에 존재하며 전반적으로 회류수조의 내곽(inner region)에서 낮은 유속을 보이며 외곽(outer region)에서는 높은 유속을 보였다. 이러한 유동 특성은 수평형 회류수조의 곡선 구역에서 유동박리와 연속 유체가 원심력에 의한 압력 구배로 바깥쪽의 유속이 증가 효과로 인하여 나타난다[7]. Fig. 1과 같이 회류수조 내에는 곡선 부분에서의 유동박리를 방지하고 시험부의 균일한 유동장의 생성을 위하여 별도의 보조장치(guide vane, honeycomb 등)가 존재함에도 불구하고 수평 곡률의 영향으로 유동의 회전 외곽 방향에서 상대적으로 높은 유속이 나타난다.

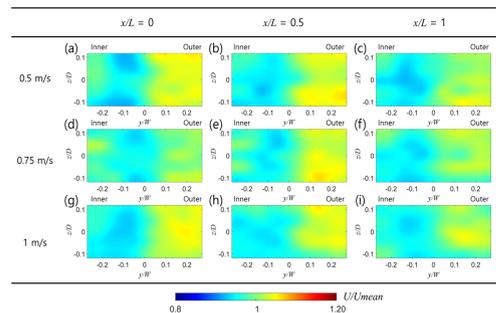


Fig. 3. Stream-wise normalized velocity( $U/U_{mean}$ ) distribution under three mean velocity case ((a)-(c) 0.5 m/s, (d)-(f) 0.75 m/s, (g)-(i) 1 m/s) at three cross-sections ( $x/L = 0, 0.5, 1$ )

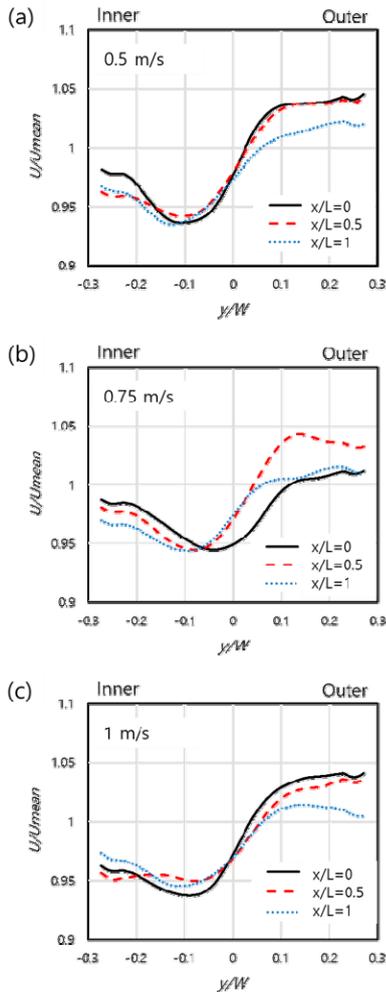


Fig. 4. Average of flow velocity distribution at the same x-coordinate under three mean velocity case ((a) 0.5 m/s, (b) 0.75 m/s, (c) 1 m/s) at three cross-sections ( $x/L = 0, 0.5, 1$ )

또한 시험 단면이 최초의 유속에서 멀어지는 방향, 즉  $x/L = 0$ 에서  $x/L = 1$ 로 진행함에 따라 유속의 내곽과 외곽의 불균일이 다소 회복되기는 하나 여전히 유속에 차이가 있으며 시험 단면에 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 동일  $y$ 방향의 무차원 계수인  $y/W$  좌표에서 유속( $U/U_{mean}$ )을 깊이 방향인  $z$  축을 따라 평균 내어 그 래프로 나타낸 것이다. 전반적으로  $U/U_{mean}=1$ 인 지점은  $y/W = 0.02 \sim 0.1$ 에 존재하며 수조 중심보다는 다소 외곽에 치우쳐 있다. 곡물이 존재하는 수로(channel)에서는 외곽 방향으로 작용하는 원심력과 내곽 방향으로 작용하는 압력구배의 불균일한 상호작용으로 인하여 곡물

에 의한 이차 흐름(curvature-induced secondary flow)이 발생하며 비대칭적인 유속 분포를 야기한다[8,9].

설정 유속 0.5 m/s(Fig. 4(a))에서는  $y/W = -0.1$ 에서 최저 유속( $U/U_{mean} = 0.934$ )을 보였으며 유동이 회류수조의 길이 방향( $x/L = 0$ 에서  $x/L = 1$ )으로 진행함에 따라 외곽의 가속된 유속이  $U/U_{mean} = 1.037$ 에서  $U/U_{mean} = 1.022$ 로 감소함을 알 수 있다.

설정 유속 0.75 m/s(Fig. 4(b))에서는 최저 유속을 보이는 지점이  $x/L = 0$ 에서는  $y/W = -0.04$ 이지만  $x/L = 0.5$ 와  $x/L = 1$ 에서는  $y$ - 방향으로 이동하여  $y/W = -0.1$ 에 위치하였다. 또한  $x/L = 0.5$ 에서 외곽의 유속이 가장 높게 형성되어 불균일한 유동 양상이 두드러졌다. 이와 같이 수조의 전면부보다 중앙부에서 최대 유속이 높게 나타나는 양상은 다른 연구에서도 제시되었다[7]. 수로의 곡선 구역에서 감소된 유속이 개수로(open channel)에 해당하는 시험 단면부에 진입하면서 수로의 수위가 증가와 함께 유속은 증가가 이어지며, 수위가 안정적으로 유지된 후에는 유속 역시 균일해지는 양상을 보인다.

본 회류수조에는 전면부에서의 수위 상승과 정제파를 방지하고자 시험단면 입입부에 제파판이 설치되어 있다. 낮은 유속(0.5 m/s)에서는 수면 유동의 변동이 보다 높은 유속에 비해 상대적으로 낮기 때문에 입입부에서 수면이 제파판에 완전히 닿을 정도로 수위가 상승하지 않는다. 하지만 설정 유속 0.75 m/s에서는 곡물에 따른 외곽과 내곽의 수위 차이로 인해 외곽 부분의 수면은 제파판에 영향을 받으나 내곽의 수면은 제파판에 닿지 않아 불균일한 유동 양상이 두드러졌다. 한편, 설정 유속 1 m/s의 경우에는 상기 두 조건 보다 빠른 유속에 의하여 전면부에서 외곽과 내곽의 수위가 모두 상승하여 제파판에 의해 초기 수위가 영향을 받았다. 곡물이 있는 개수로에서의 수위 상승은 수로의 유동에 영향을 미치며, 전산 유체역학에서도 정확한 유동 예측을 위하여 수위 상승에 대한 계산을 적용하고 있다[10].

마지막으로 설정 유속 1 m/s(Fig. 4(c))에서는  $x/L = 0.5$  구간의  $y/W < -0.05$ 에서 최저점 없이 비교적 균일한 유속 분포( $U/U_{mean} \sim 0.95$ )를 보였다.

### 3.2 난류 강도

유동의 난류 강도는 Eq. (2)와 같으며 측정 구간( $x/L = 0, 0.5, 1$ )에서의 난류 강도( $I$ )를 해당 구간에서의 평균 유속(0.5, 0.75, 1 m/s)에 대하여 나타내었다(Fig. 5).

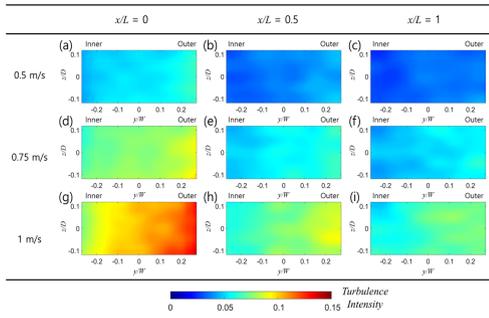


Fig. 5. Stream-wise normalized turbulence intensity distribution under three mean velocity case ((a)-(c) 0.5 m/s, (d)-(f) 0.75 m/s, (g)-(i) 1 m/s) at three cross-sections ( $x/L = 0, 0.5, 1$ )

$$I = \frac{\sigma_U}{U} \quad (2)$$

Where  $\sigma_U$  denotes standard deviation of velocity,  $U$  denotes velocity

난류 강도의 경우 평균 유속이 증가할수록 상승하는 경향을 보였으며, 측정 구간 길이에 따라서는 후면부로 갈수록 난류강도가 낮은 경향을 보였다. 난류영역에서는 길이 방향으로 통상 수력학적 직경(Hydraulic diameter)에 10배 이상의 영역에서 완전 발달 유동으로 간주 될 수 있으며, 본 시험에서는 입구의 직경 대비 총 시험 단면 길이 방향은 10배 미만으로 유동이 완전한 발달이 되었다고 확인하기는 불가능하다. 그러나 상기와 같은 시험 단면의 규모의 한계를 고려하여 평균 난류 강도의 분포를 상호 비교하면 수력학적 길이 방향으로 진행하며 낮아지는 경향성은 시험 결과를 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 6는 동일  $y/W$  좌표에서 난류 강도들을  $z$  축을 따라 평균화로 나타낸 것이다. 난류 강도는 유속 분포와는 다르게 일관된 경향성을 가지며 분포하였다. 전체적으로 유속 증가에 따라 난류 강도가 증가하였으며 내곽에서 외곽으로 갈수록 증가하였다. 모든 유속 조건에서  $x/L = 0$ 에서 높은 난류 강도를 보였으며  $x/L = 0.5$ 에서는 감소하여  $x/L = 1$ 과 비슷한 수치를 나타냈다. 이를 통해  $x/L = 0$ 에서  $x/L = 0.5$ 까지는 유동 발달이 진행 중이며 유동의 불균일성이 높다고 할 수 있다.

조류 발전기 시험의 경우 유동 특성에 의해 출력 결과가 민감하게 변화하며[11], 와유기 진동은 블레이드의 추력과 편하중 문제를 야기하며 장치의 수명을 단축시킬 우려가 있다[12,13]. 따라서 정밀한 조류 발전기의 특성 시험을 위해서는 균일한 유속 분포 영역의 선정과 더불어

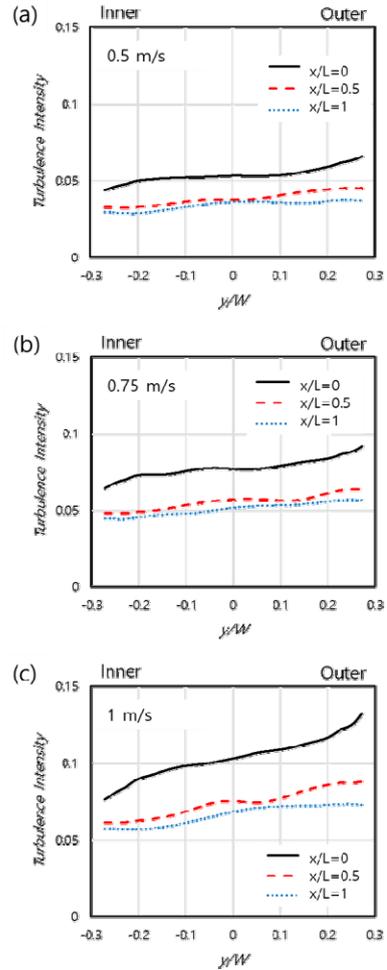


Fig. 6. Average of turbulence intensity distribution at the same  $x$ -coordinate under three mean velocity case ((a) 0.5 m/s, (b) 0.75 m/s, (c) 1 m/s) at three cross-sections ( $x/L = 0, 0.5, 1$ )

어 회류수조의 유동 분포 특성을 파악해야 한다. 본 연구의 결과를 통해 시험 시설에서도 시험 단면의 위치에 따라 유속과 난류 강도의 분포가 상이하게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

예를 들면 Fig. 4에서 나타난 바와 같이 최저 유속을 보이는  $y/W = -0.1$ 에서 유속 분포가 평탄한 구역이 국소적으로 존재하며  $y/W > 0.1$ 에서도 평탄한 유속 분포 구역이 비교적 넓게 존재하기 때문에 터빈의 입사 유속의 균일성 측면에서는 적절한 시험 영역이다. 하지만 회류수조의 외곽( $y/W > 0.1$ )에서는 높은 난류 강도(Fig. 6)가 형성되기 때문에 해당 영역에서는 발전기에 미치는 영향을 고려해야 한다.

또한 대형 회류수조의  $x/L = 0$ 에서  $x/L = 0.5$ 까지는 시험 유속 전 범위에서 유동 발달이 여전히 진행 상태임을 확인하였다. 특히 유속 1 m/s의  $x/L = 0$  지점에서는 0.1 이상의 강한 난류 강도의 형성을 확인하였으며 향후 발전기 실험 설계의 목적에 따라 위치 선정에 주의가 필요할 것으로 판단한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 조류 발전기의 축소 모형 성능 시험에 필수적으로 요구되는 시험 시설인 대형 회류수조의 유동 특성을 파악하였다. 유동가시화는 PIV를 활용하여 분석하였으며, 유동 특성 파악을 위해 설정 유속 0.5, 0.75, 1 m/s에서 회류수조의 시험 단면 흐름 방향의 전면부, 중앙부, 후면부에서의 유속 분포와 난류 강도를 측정하였고 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 최대 유속은 회류수조의 가장 외곽에 형성되었지만 최저 유속은  $y/W = -0.1$  부근에 존재하였다.  $U/U_{mean} = 1$ 인 지점은  $y/W = 0.02 \sim 0.1$ 에 존재하며 수조 중심보다는 다소 외곽에 치우쳐 있음을 확인하였다.
2. 난류 강도의 경우 유속이 증가할수록 비례적으로 증가하였으며 내곽에서 외곽으로 갈수록 증가하는 일관된 경향성을 보였다.
3. 본 연구를 통해 유속이 일정하게 보이는 지역에서도 국소적으로 높은 난류 강도가 형성되었다. 수중에서 회전하는 조류 발전기의 출력의 경우 시계열에 따른 입사 유속에 민감하게 반응하므로, 회류수조의 유속 분포가 비교적 균일한 영역 선정이 필수적이다. 이에 따라 시험 조건 선정에 있어 상기 두 인자를 사전에 복합적으로 확인하여 유동의 입사 방향과 수직방향에 대해 적절한 시험 구역을 선정하여야 한다.

향후 본 연구결과가 조류 발전기를 비롯한 수중 구조체와 더 나아가 수중에서 독립적 동적 거동을 갖는 무인 로봇 등을 평가하는 시험 설계에 다양하게 활용될 것으로 기대한다.

#### References

- [1] S. Carley, "State renewable energy electricity policies: An empirical evaluation of effectiveness", *Energy policy*, Vol.37, No.8, pp.3071-81, Aug. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.03.062>
- [2] M.J. Khan, G. Bhuyan, M.T. Iqbal, J.E. Quaicoe, "Hydrokinetic energy conversion systems and assessment of horizontal and vertical axis turbines for river and tidal applications: A technology status review", *Applied energy*, Vol.86, No.10, pp.1823-1835, Oct. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.02.017>
- [3] D. Satrio, I.K.A.P. Utama, Mukhtasor, "Vertical Axis Tidal Current Turbine: Advantages and Challenges Review", *Proceeding of Ocean, Mechanical and Aerospace-Science and Engineering-*, Vol.3, No.1, pp.64-75, Nov. 2016.
- [4] E.E. Lust, K.A. Flack, L. Luznik, "Survey of the near wake of an axial-flow hydrokinetic turbine in quiescent conditions", *Renewable energy*, Vol.129, Part A, pp.92-101, Dec. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.05.075>
- [5] M. Nuernberg, L. Tao, "Experimental study of wake characteristics in tidal turbine arrays", *Renewable energy*, Vol.127, pp.168-181, Nov. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.053>
- [6] R.K. Singh, M.R. Ahmed, "Blade design and performance testing of a small wind turbine rotor for low wind speed applications", *Renewable energy*, Vol.50, pp.812-819, Feb. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.08.021>
- [7] R. Bai, D. Zhu, H. Chen, D. Li, "Laboratory study of secondary flow in an open channel bend by using PIV", *Water*, Vol.11, No.4, pp.659, March. 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11040659>
- [8] Lazzarin, T., Viero, D. P., "Curvature-induced secondary flow in 2D depth-averaged hydro-morphodynamic models: An assessment of different approaches and key factors", *Advances in Water Resources*, Vol.171, Jan. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104355>
- [9] Sun, Y, Yi, X, Ma, J, Tian, Y, Gu, Z, "Characteristics of secondary flow vorticity and longitudinal velocity in a sharp bend", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 2565, No. 1, Aug. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2565/1/012021>
- [10] Lugina, F. P, Uchida, T, Kawahara, Y, "Numerical Calculations for Curved Open Channel Flows with Advanced Depth-Integrated Models", *KSCE Journal of Civil Engineering*, Vol.28, pp.1026-1040, Jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12205-024-1431-7>
- [11] A.M.E. Makdah, S. Ruzzante, K. Zhang, D.E. Rival, "The influence of axial gusts on the output of low-inertia rotors", *Journal of Fluids and Structures*, Vol.88, pp.71-82, July. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2019.04.009>
- [12] B. Gaurier, Ph. Druault, M. Ikhennecheu, G. Germain, "Experimental analysis of the shear flow effect on

tidal turbine blade root force from three-dimensional mean flow reconstruction”, *Philosophical Transactions of The Royal Society A*, Vol.378, No.2178, 20200001, Aug. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0001>

- [13] Xie, T, Wang, T, He, Q, Diallo, D, Claramunt, C, “A review of current issues of marine current turbine blade fault detection”, *Ocean Engineering*, Vol.218, 108194, Dec. 2020.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.108194>

정 세 진(Sejin Jung)

[정회원]



- 2017년 2월 : 성균관대 기계공학부 (공학사)
- 2020년 2월 : 성균관대 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 6월 ~ 2023년 6월 : 한국 해양과학기술원 전문연구요원
- 2023년 9월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 기술원

<관심분야>

공학수조 실험, 해양로봇, 실험유체역학

문 성 민(Seong Min Moon)

[정회원]



- 2017년 2월 : 동아대학교 토목공학과 (공학사)
- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 연구원

<관심분야>

유동가시화, 토목공학

김 흥 찬(Heungchan Kim)

[정회원]



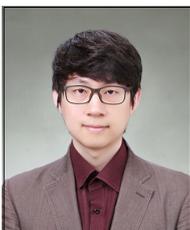
- 2005년 2월 : 대구가톨릭대학교 지리교육과 (학사)
- 2013년 11월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 기술원

<관심분야>

수중장비, 수중조사

이 희 범(Heebum Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 서울대학교 대학원 산업·조선공학부 (공학석사)
- 2015년 2월 : 서울대학교 대학원 산업·조선공학부 (공학박사)
- 2015년 3월 ~ 2016년 5월 : 서울대학교 해양시스템공학연구소 연수연구원

- 2016년 5월 ~ 현재 : 한국수력원자력(주) 선임연구원

<관심분야>

유체역학, 난류유동

서 창 현(Chang Hyeon Seo)

[정회원]



- 2017년 2월 : 한국폴리텍대학교 (전문학사)
- 2018년 7월 ~ 2021년 12월 : ABB코리아
- 2022년 1월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 기술원

<관심분야>

전기

장 인 성(In Sung Jang)

[종신회원]



- 1995년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (석사)
- 2001년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (박사)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 책임연구원

- 2023년 3월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 해양신산업연구본부 본부장

<관심분야>

해양로봇, 지반공학

---

김 지 훈(Jihoon Kim)

[정회원]



- 2010년 2월 : 건국대학교 항공주우정보시스템공학과 (공학석사)
- 2014년 8월 : 성균관대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 ~ 2016년 12월 : 한국해양과학기술원 박사 후 연수연구원

- 2016년 12월 ~ 현재 : 한국해양과학기술원 선임연구원

<관심분야>

유동가시화, 실험유체역학