

저 유속 해역에서 수중 둔덕과 조류발전기 덕트로 인한 유속 증폭 효과 수치해석

전재혁¹ · 허상환² · 구원철^{3,†}

¹인하대학교 조선해양공학과 연구생

²인하대학교 조선해양공학과 전임연구원

³인하대학교 조선해양공학과 교수

Numerical Investigation of Flow Velocity Enhancement by a Submerged Mound and a Ducted Tidal Turbine in Low-Current Waters

Jaehyuk Jeon¹, Sanghwan Heo², and Weoncheol Koo^{3,†}

¹Undergraduate Researcher, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

²Research Associate, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

³Professor, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University, Incheon 22212, Korea

요 약

해양에너지 중 조류에너지는 예측 가능하고 안정적인 전력 생산이 가능하다는 점에서 차세대 에너지원으로 주목받고 있다. 조류발전 시스템의 출력은 유속의 세제곱에 비례하므로, 발전 효율을 향상시키기 위해서는 유속 증폭 기술이 필요하다. 본 연구에서는 해상 교량 교각 주변과 같은 저 유속 해역에서 조류 터빈 발전 효율을 높이기 위해, 해저 둔덕과 덕트를 조합한 총 5가지 유속 증폭 구조물 형상을 제시하였다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 기반의 수치 해석 프로그램(STAR-CCM+)을 활용하여 유동장을 해석하고, 각 형상에 따른 유속 변화 및 증폭률을 비교 분석하였다. 본 연구에서 제시한 조건에서, 수중 둔덕과 덕트가 결합된 형상은 약 47%의 평균 유속 증폭률을 보였고, 자유수면 효과가 추가되면 최대 약 60%의 유속 증폭 효과가 발생하였다. 이는 자유수면의 하강 현상으로 인해 덕트 상부로 우회하려는 유동이 억제되어 유체장 내부로 강하게 밀어 넣는 추가 증폭 기제로 작용하기 때문으로 판단된다. 본 연구 결과는 저 유속 해역에서 조류발전 터빈의 성능 향상을 위한 설계 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract – Tidal energy has attracted considerable attention as a next-generation renewable energy source due to its high predictability and stable power generation. Since the power output of a tidal turbine is proportional to the cube of the flow velocity, enhancing the local current velocity is essential for improving energy conversion efficiency. In this study, five flow-acceleration configurations combining a submerged mound and a duct are proposed to enhance the performance of tidal turbines in low-current environments, such as those surrounding offshore bridge piers. The flow fields were analyzed using the computational fluid dynamics (CFD) software STAR-CCM+, and the flow velocity and enhancement ratio were compared for each configuration. The combined submerged mound–duct configuration increased the mean flow velocity by approximately 47%. When the free-surface effect was considered, the maximum flow velocity enhancement reached approximately 60%. This additional acceleration is attributed to the free-surface depression, which suppresses the bypass flow over the duct and promotes stronger flow through the duct interior. The findings of this study provide useful design guidelines for improving the performance of tidal turbines operating in low-current environments.

Keywords: Tidal turbine(조류터빈), Duct(덕트), Flow velocity enhancement(유속 증폭), Submerged mound(수중 둔덕), Low-current waters(저 유속 해역), Offshore bridge(해상 교량)

[†]Corresponding author: wckoo@inha.ac.kr

1. 서 론

친환경 에너지의 중요성이 대두됨에 따라 신재생에너지 분야 중 하나인 해양에너지에 대한 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다 (Mejia-Olivares *et al.*[2018]). 우리나라 역시 Net-Zero 2050 달성을 위해 신재생에너지 기술 개발의 필요성이 증가하고 있으며(KIER [2022]; Ministère de la Transition Écologique[2020]), 이 중 조류 발전은 조석에 의해 발생하는 주기적인 해수 흐름의 운동에너지를 이용하므로 발전량 예측이 용이하고 안정적인 전력 생산이 가능하다는 장점이 있다(Ministry of Oceans and Fisheries(MOF)[2020]). 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있으며, 특히 서남해안은 복잡한 해안선과 다수의 도서, 큰 조차 및 조류 특성으로 인해 조류에너지 개발 가능성이 높은 해역으로 평가된다(Park *et al.*[2018]).

이러한 국내 해역의 조류에너지 잠재량은 향후 조류발전 기술의 적용 가능성과 연구 필요성을 뒷받침한다. 일반적으로 발전기의 출력은 유입 유속의 세제곱에 비례하므로(Fraenkel[2002]) 충분한 발전 성능을 확보하기 위해서는 일정 수준 이상의 고 유속 환경이 요구된다. 예전부터 조류발전기 터빈의 유속 증폭에 관한 연구가 많이 진행되어 왔지만(Mehmood *et al.*[2012]; Shives and Crawford[2011]; Belloni *et al.*[2017]), 기존 조류터빈은 주로 2 m/s 이상의 해역을 중심으로 설계되어 왔으며(Encarnacion *et al.*[2019]), 실제 해양 환경에 넓게 분포하는 2 m/s 미만의 저 유속 해역에서는 경제성 확보가 어려운 실정이다(British Research and Innovation (UKRI)[2018]). 특히 평균 유속이 1 m/s 미만인 환경에서는 터빈의 cut-in speed 제약으로 인해 발전 자체가 제한될 수 있다(Nasab and Kilby[2021]). 따라서 조류발전의 활용도를 높이려면 터빈으로 유입되는 유속을 효과적으로 증폭시킬 수 있는 구조적 접근이 필요하다.

한편, 조류발전 터빈이 안정적으로 운용되기 위해서는 터빈을 지지할 수 있는 고정 구조물과 유지·관리가 용이한 설치 환경이 요구된다. 이러한 조건을 충족하는 대표적인 장소로 해상 교량을 들 수 있다. 그러나 우리나라의 대부분의 해상 교량은 조류 유속이 비교적 낮은 해역에 위치하고 있어, 기존 조류발전 터빈을 그대로 적용할 경우 발전 효율이 제한적이라는 한계가 있다. 만약 이러한 저 유속 환경에서 효과적인 유속 증폭이 가능하다면, 해상 교량 교각에 조류발전 터빈을 설치하여 전력을 생산하고 이를 교량의 조명, 계측 시스템, 유지관리 설비 등의 운영에 활용할 수 있을 것이다. 이는 해상 교량을 단순한 교통 인프라를 넘어 에너지를 생산하는 친환경 자립형 인프라로 확장하는 새로운 설계 개념을 제시할 수 있다는 점에서 의미가 있다.

본 연구에서는 저 유속 해역의 한계를 극복하기 위한 방안으로, 수중 둔덕(Submerged mound)과 덕트(Duct)를 결합한 유속 증폭 구조물을 제안한다. 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 기반의 수치해석을 수행하여 수중 둔덕과 덕트가 각각 유동장에 미치는 영향과 두 구조물이 결합되었을 때의 복합적인 유속 증폭 효과를 정량적으로 평가하였다. 또한, 자유수면 조건이 덕트 내부의 유동 특성 및 유속 증폭 효과에 미치는 영향을 분석하여 그

증폭 메커니즘을 규명하고자 하였다. 이를 통해 저 유속 해역에서 조류발전 터빈의 발전 성능을 향상시키기 위한 유속 증폭 구조물의 기초 설계 정보를 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 본 연구에서 제안한 유속 증폭 구조물의 형상 및 체원을 정의하고, CFD 기반의 수치해석 방법론, 경계 조건 설정 및 수렴성 검증 결과를 상세히 설명한다. 제3장에서는 구조물 형상 및 유입 유속 변화에 따른 유동장 분포와 유속 증폭률을 정량적으로 비교 분석하며, 특히 자유수면 효과가 유속에 미치는 영향을 분석한다. 마지막으로 제4장에서는 본 연구의 결론 및 향후 활용 방안을 제시한다.

2. 수치해석 및 대상 구조물

본 연구는 해상 교량 주변의 저 유속 해역에서 조류발전 시스템의 실해역 적용성을 검토하기 위한 예비 연구로서, 폭 1.0 m, 높이 1.1 m, 최대 유속 1.1 m/s인 인하대학교 회류수조(Circulating Water Channel, CWC)의 운용 범위를 모사한 축소 모델(실제 크기의 약 1/10)을 대상으로 수행되었다. 해석 유속은 저 유속 조류 조건과 회류수조의 운용 범위를 반영하여 0.2-1.0 m/s 범위로 설정하였으며, 프루드 상사법칙(Froude similarity law)에 의해 이를 원 스케일(Full-scale)로 환산 시, 대상 수심은 약 9 m 이상, 유입 유속은 0.63-3.16 m/s 범위에 대응된다. 본 수치해석은 상용 CFD 소프트웨어인 STAR-CCM+ Ver. 2402를 사용하여 수행되었다(Siemens Digital Industries Software[2024]).

형상 조건에 따른 덕트와 수중 둔덕의 개별적·복합적 기여도를 정량적으로 평가하기 위해 해석 모델은 Fig. 1과 같이 총 5가지 Case로 구분하였다. 구체적으로는 구조물이 없는 기본 조건(Case A), 수중 둔덕 단독(Case B), 덕트 단독(Case C), 두 구조물의 결합(Case D), 그리고 결합 구조물에 자유수면이 포함된 조건(Case E)으로 구성하였다. 이 중 자유수면이 포함되지 않은 Cases A-D는 유체 상부에 slip wall 경계조건을 설정하여 마찰이 없는 상태를 모사하였다. 각 구조물의 주요 설계 변수 및 체원은 조류발전기 덕트 형상과 수중 둔덕의 개별 최적화를 수행한 선행연구(Kim *et al.* [2025]; Kim and Koo[2025])를 기반으로 선정하였다. 또한, 덕트로 인한 유속 증폭 효과를 보다 정확하게 분석하기 위해 덕트 내에 터빈은 존재하지 않는 조건으로 계산을 수행하였다. 수심은 0.90 m 이고, 수중 둔덕의 높이는 0.16 m이다. 덕트의 X축 중심 위치는 수중 둔덕의 중심 위치와 동일하게 설정하였으며, Z축 중심 위치는 바닥으로부터 0.36 m 부분이다. Fig. 1의 개략도(Schematic diagram)에 나타난 수중 둔덕은 편의상 각진 사다리꼴 형태로 도시하였으나, 실제 수치해석에 적용된 형상은 모서리를 곡면 처리하였다. 덕트와 수중 둔덕의 상세체원은 Fig. 2와 Table 1과 같다.

2.1 해석방법

본 연구에서는 비압축성 점성 유동을 가정하였으며, 지배방정식으로 Navier-Stokes 방정식을 사용하였다. 난류 유동 해석을 위해

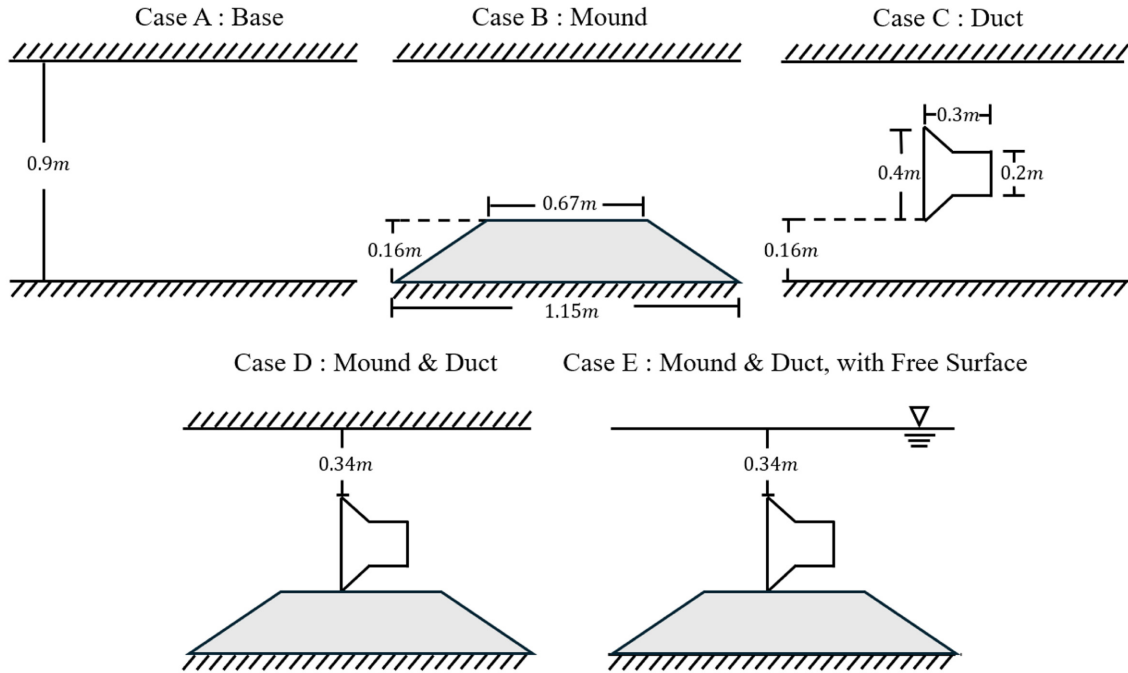


Fig. 1. Schematic configurations of Cases A-E.

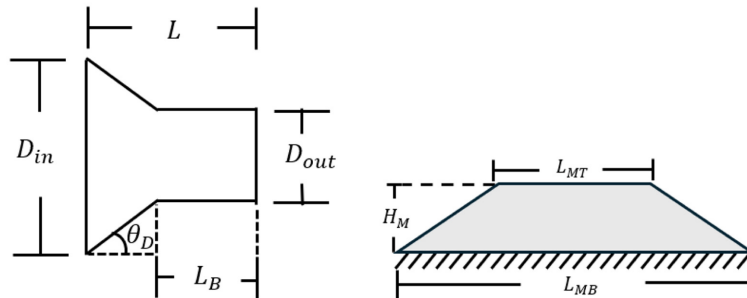


Fig. 2. Geometry and design parameters of duct and submerged mound (Kim *et al.*[2025]).

Table 1. Specifications of duct and submerged mound (Kim *et al.*[2025])

Item	Unit	Dimension
Duct Diameter (D_{in} , D_{out})	m	0.4, 0.2
Duct Inlet Angle (θ_D)	degrees	45
Duct Length (L)	m	0.3
Duct Body Length (L_B)	m	0.2
Mound Top Length (L_{MT})	m	0.67
Mound Bottom Length (L_{MB})	m	1.15
Mound Height (H_M)	m	0.16
Mound Angle (θ_M)	degrees	45
Water Depth	m	0.9

시간 평균화된 Reynolds-Averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식을 적용하였다. 본 연구에서는 해석 형상이 비교적 단순하고, 다양한 유입 유속 및 형상 조건에 대한 반복 계산이 요구되는 점을 고려하여 벽 함수(Wall Function)로 벽면 근처에서의 영향을 모사하

는 k- ϵ 모델을 적용하였고, Y^+ 는 30 이상으로 설정하였다(Pena *et al.*[2021]).

자유수면 조건이 유속 증폭에 미치는 영향을 분석하기 위해 Case E에는 Volume of Fluid(VOF) 방법을 적용하여 자유수면을 구현하였다. VOF 방법을 통해 공기와 물의 계면을 추적하고, 덕트와 수중 둔덕 결합 구조 주변에서 발생하는 자유수면 변형을 고려한 해석을 수행하였다.

2.2 경계 조건 및 격자 구성

본 연구에서는 덕트와 수중 둔덕 주변의 3차원 유동장을 해석하기 위해 3차원 계산 영역을 구성하였다. Table 2는 수치해석 조건을 정리한 것이다. 모든 Case에 동일하게 해석 조건을 적용하였으며, 작동 유체는 25°C 등온 조건의 담수로 설정하였고, 유입 경계에는 0.2~1.0 m/s의 속도 유입(velocity inlet) 조건을 0.1 m/s 간격으로 적용하였다. 출구 경계는 0 Pa의 압력 출구(pressure outlet) 조건으로

Table 2. Simulation conditions for the numerical analysis

Description	Value
Inlet	Velocity Inlet 0.2~1.0 [m/s]
Outlet	Pressure Outlet (0 Pa)
Turbulence model	k- ϵ

설정하였다.

Fig. 3은 자유수면을 고려하지 않은 Cases A-D의 계산 영역 및 경계 조건을 나타낸 것이다. 본 연구에서 수행된 모든 수치해석에서, 계산 영역은 수치해석 시간 저감을 위해 XZ-면 경계조건에 symmetry plane을 적용하여 전체 영역의 절반만 모델링하였다. 바닥면, 덕트 및 수중 둔덕 표면에는 점성 유동에 의한 벽면 효과를 고려하기 위해 No-slip wall 조건을 적용하였다. 자유수면 변형을 직접 모사하지 않는 Cases A-D에서는 계산 효율성을 고려하여 상부 경계면에 slip wall 조건을 적용하였다.

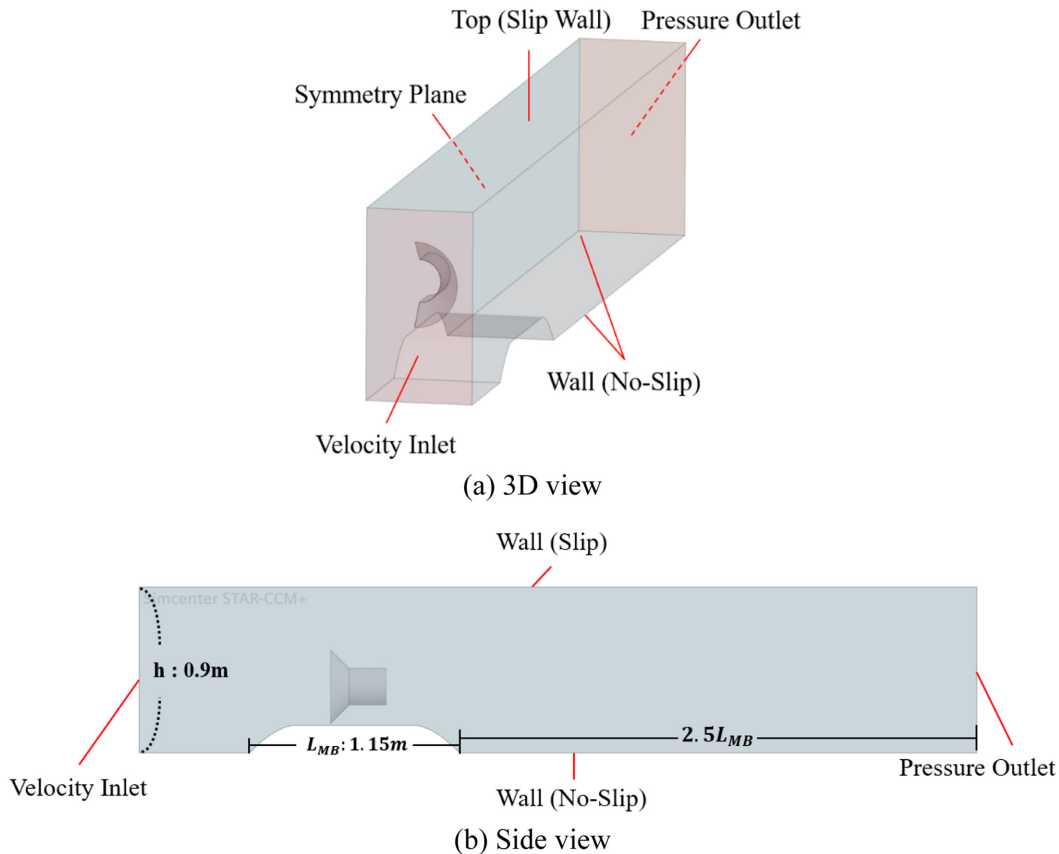
자유수면을 고려한 Case E의 경계 조건은 Fig. 4와 같다. 자유수면 해석 영역은 물과 공기 영역으로 구성하였다. 상부 및 출구 경계면에는 대기 중으로 개방된 실제 해양 환경을 현실적으로 모사하기 위해 압력 출구 조건을 적용하였다. 속도 유입 조건은 일정한 유동 공급으로 수치적 안정성은 우수하나 대기 경계를 왜곡할 우려가 있다. 다만, 압력 출구조건 특성상 경계면 근처의 유동 교

란에 의한 역류(Backflow) 및 수치적 발산 위험이 존재하므로, 이를 방지하고자 공기 영역의 높이를 충분히 확보하였고, 인접한 경계면이 관심 영역에 미칠 영향을 최소화하기 위해 X축 유동 진행 방향의 길이는 수중 둔덕 하부 길이(L_{MB})의 5배, Z축 공기 영역의 높이는 수심의 3배로 설정하여 해석의 안정성을 유지하였다(Franke *et al.* [2007]).

Fig. 5는 계산영역의 측면 격자(mesh)를 나타낸 것이다. 총 격자 수는 5,371,001개이며, 사각 격자 형태로 자유수면을 잘 포착할 수 있는 Trimmed mesh를 적용하였다.

2.3 유속 산정 위치 및 측정 방법

본 연구에서는 각 Case의 유속 증폭 효과를 정량적으로 비교하기 위해 터빈 유입부에 해당하는 영역의 대표 유속을 산정하였다. Fig. 6의 분홍색 점 및 영역은 각 Case에서 유속을 산정(계측)한 위치를 나타낸 것이다. 덕트가 없는 Case A와 Case B의 경우에는 동일한 비교 기준을 적용하기 위해 덕트 몸통부의 중앙 위치에 해당하는 높이와 수중 둔덕의 윗부분 길이를 기준으로 1,200개의 probe를 배치하여 각 포인트마다 측정된 유속을 산술 평균하여 평균 유속을 구하였다. 덕트가 포함된 Case C, Case D 및 Case E의 경우에는 덕트 내부의 국부적인 유동 불안정성으로 인해 단일 지점 측정 시 오차가 발생할 가능성이 높다. 이를 방지하고 덕트 내부를 통

**Fig. 3.** Boundary conditions for Cases A-D with a slip boundary at the top wall.

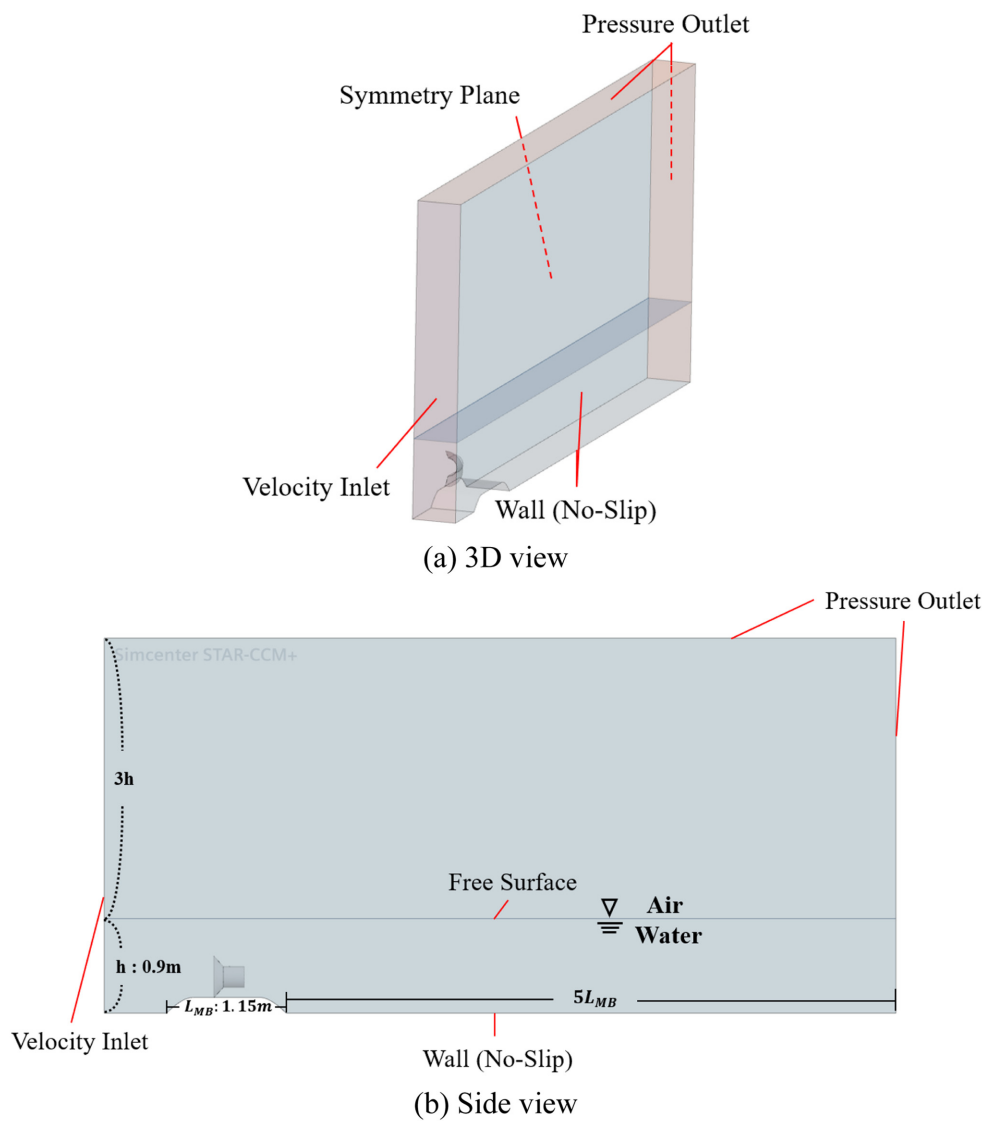


Fig. 4. Boundary conditions for Case E with free-surface boundary.

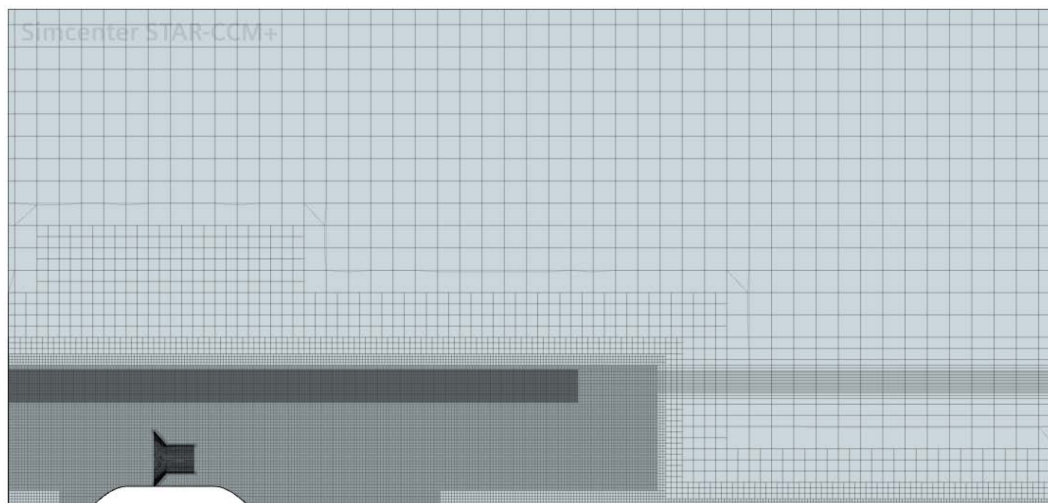


Fig. 5. Domain mesh configuration for Case E.

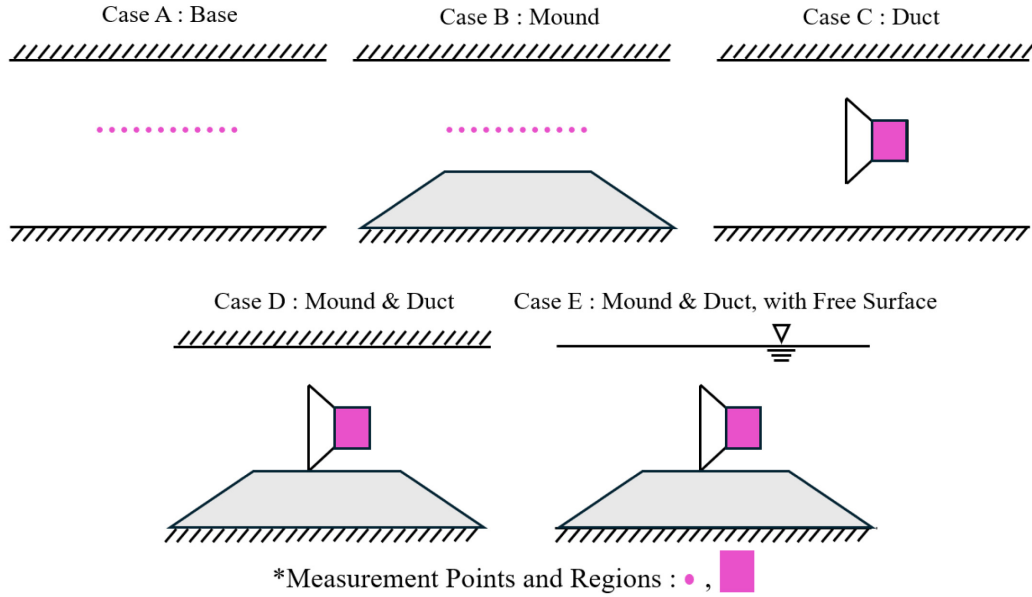


Fig. 6. Velocity measurement points and regions for each Case.

과하는 전체 유동 특성을 대변하기 위해, 덕트 몸통부의 내부 체적 전체를 유속 산정 영역으로 설정하였다. 해당 영역의 대표 유속(U)은 식 (1)과 같이 덕트 몸통부를 통과하는 유동의 X방향 속도 성분을 질량유량으로 가중 평균하여 산출하였다.

$$U = \frac{\int v_x d\dot{m}}{\int d\dot{m}} \quad (1)$$

여기서 U = 유속 산정 영역에서 산출된 X방향 질량유량 가중 평균 유속

v_x = X방향 속도 성분

$d\dot{m}$ = 측정 영역을 통과하는 미소 질량유량

2.4 수렴성 검증

수치해석 수행에 앞서, 수치해석 결과의 신뢰성을 확보하기 위해 격자 크기 및 시간 간격에 대한 수렴성 검증을 수행하였다. 수렴성 검증은 구조물에 의한 유속 변화가 발생하는 Cases B-E를 대상으로 수행하였다.

2.4.1 격자 수렴성 검증

격자 크기에 대한 수렴성을 확인하기 위해, 각 Case에 대해 격자 크기가 큰 순서에 따라 Coarse, Medium, Fine의 세 가지 격자계를 구성하였으며, 격자 세분화 비율(r_G)은 $\sqrt{2}$ 로 설정하였다. 해석 결과의 수렴성은 Richardson 외삽법, ITTC(2008) 및 GCI(Grid Convergence Index) 기법을 통해 평가하였다(ITTC 7.5-03-01-01[2008]). 본 연구에서는 세 가지 격자에 대한 비교를 통해 수렴성을 평가하였으며, GCI 기법의 안전 계수는 1.25를 적용하였다. U_G (Grid Uncertainty)는 격자 해상도에 따른 수치적 불확실성을 의미한다.

$$U_{G,\Delta t_{fine}} = \frac{1.25 \left| 1 - \frac{S_2}{S_1} \right|}{r_{G,\Delta t}^p - 1} \quad (2)$$

여기서 S_1 = Level-Fine에서 산출된 유속

S_2 = Level-Medium에서 산출된 유속

S_3 = Level-Coarse에서 산출된 유속

p = 겉보기 차수

겉보기 차수 p 는 식 (3)과 같다.

$$p = \frac{1}{\ln(r_G)} \left| \ln \left| \frac{\varepsilon_{32}}{\varepsilon_{21}} \right| \right| \quad (3)$$

여기서 $\varepsilon_{ij} = S_i - S_j$ 두 Level에서 산출된 유속의 차이 격자 크기의 수렴성(수렴비: R)은 식 (4)로 평가하였다(Roache *et al.*[1986]).

$$R = \frac{\varepsilon_{21}}{\varepsilon_{32}} \begin{cases} 0 < R < 1: \text{Monotonic convergence} \\ -1 < R < 0: \text{Oscillatory convergence} \\ |R| \geq 1: \text{Divergence} \end{cases} \quad (4)$$

격자 간 크기 차이가 가장 큰 조건에서의 격자 수렴성을 검증하기 위해, 유입 경계에서의 유입 속도(U_0)를 1.0 m/s로 적용하였을 때의 수렴성 비교 결과를 Table 3에 정리하였다. Case B, Case C 및 Case E는 수렴비 R 이 각각 0.491, 0.110, 0.396으로 나타나 $0 < R < 1$ 의 단조수렴(Monotonic convergence) 경향으로, 격자를 세분화함에 따라 산정값이 일정한 방향으로 변화하며 수렴해 감이 확인되었다. 이는 해상도 증가에 따라 수치해가 점근값에 점진적으로 접근하고 있음을 의미한다. Case D는 $R = -0.433$ 으로 진동수렴(Oscillatory convergence) 경향을 보였다. 진동수렴은 해상도 증가에 따라 산정값이 단조적으로 변화하지 않고 기준값 주변에서 교번하는 양상이 나타나고, 값이 한 방향으로만 접근하지는 않지만, 해상도 증가에 따라 진동 폭이 줄어들어 수렴값 주변으로 접근하게 된다. 이러한

Table 3. Grid convergence test at $U_0 = 1.0$ m/s

Case	Mesh level	Number of grids [$\times 10^6$]	U [m/s]	p	R	U_G [%]
Case B	Coarse	0.4	1.244	2.00	0.491 (Monotonic convergence)	0.76
	Medium	0.8	1.260			
	Fine	1.88	1.268			
Case C	Coarse	0.42	1.249	6.64	0.110 (Monotonic convergence)	0.05
	Medium	1.14	1.289			
	Fine	3.33	1.293			
Case D	Coarse	0.69	1.424	2.39	-0.433 (Oscillatory convergence)	3.77
	Medium	1.52	1.536			
	Fine	4.29	1.487			
Case E	Coarse	0.71	1.503	2.62	0.396 (Monotonic convergence)	1.46
	Medium	1.89	1.575			
	Fine	5.37	1.604			

진동수렴은 언덕과 덕트의 결합으로 인해 유동 구조가 복잡해짐에 따라, 측정 위치의 유속이 격자 해상도에 더욱 민감하게 반응한 결과로 판단된다. Case E에서는 상부 경계조건을 slip wall에서 자유수면 조건으로 변경함에 따라 압력과 수면 변동이 유동을 보다 안정적으로 반영하여 단조수렴이 나타난 것으로 판단된다. 겉보기 차수(p)는 Case B, Case C, Case D 및 Case E에서 각각 2.00, 6.64, 2.39, 2.62로 계산되었다. Case C의 겉보기 차수가 상대적으로 큰 값인 것은, ϵ_{21} 의 값이 약 0.004로 매우 작았기 때문이다. U_G 는 Case B, Case C, Case D 및 Case E에서 각각 0.76%, 0.05%, 3.77%, 1.46%로 산정되었다. 이에 따라 이후 해석에는 수렴해에 가장 가까운 Fine 격자를 적용하였다.

2.4.2 시간 수렴성 검증

정상상태 해석인 Cases A-D에 대해서는 시간항이 존재하지 않으므로 시간 수렴성 검증을 수행하지 않았으나, 자유수면을 고려한 Case E는 VOF 방법을 적용한 비정상 해석이므로 시간 간격에 따른 계산 결과의 민감도를 검토하였다. U_0 는 해석 조건 범위 내에서 가장 빠른 유입 유속 조건인 1.0 m/s를 적용하였다. 기준 시간 간격은 ITTC 권장 절차를 참고하여 해당 유속 조건에서 덕트 길이와 유동 통과 시간을 고려하여 설정하였으며, 시간 간격 비율(r_Δ)은 2를 적용하여 $\Delta t = 0.04$ s, 0.02 s, 0.01 s의 Coarse, Medium 및 Fine 조건을 구성하였고, 격자 수렴성 검증에 사용된 기법과 동일한 기법(ITTC 2008)으로 평가하였다.

Table 4는 시간 간격에 따른 수렴성 비교 결과를 나타낸 것이다. 수렴비 R은 -0.206으로 진동수렴 경향을 보였다. 겉보기 차수(p)는 Case E에서 2.12로 계산되었다. 시간 간격에 따른 수치적 불확실

성을 나타내는 시간 불확실성(Time uncertainty) $U_{\Delta t}$ 은 0.81%로 산정되었다. 따라서, 이후 자유수면 해석을 위한 Case E에서는 Fine 조건인 $\Delta t = 0.01$ s를 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Case별 속도 분포 비교

구조물이 없는 Case A에서는 모든 측정 영역에서 유속 분포(velocity distribution)는 유입 유속과 동일하게 나타났다. Fig. 7은 유입 유속 $U_0 = 1.0$ m/s 조건에서 대칭면(Symmetry plane, $Y=0$)을 기준으로 Cases B-D에 대한 유속 분포를 나타낸 것이다. 수중 둔덕만 단독으로 설치된 Case B의 경우, 둔덕의 상단부에서 국부적인 유속 증가(최대 약 1.27 m/s)가 관찰되었으며, 둔덕 하류의 경사면을 따라 유속이 저감되는 것을 확인할 수 있다. 덕트 단독형상인 Case C에서는 유동이 덕트 입구를 통해 유입되면서 내부 면적 축소에 의해 유속 증폭 효과(최대 약 1.30 m/s)를 보였다. 동시에 덕트 외곽 경계면에서 저속 후류(wake)가 길게 뻗어 나가는 것이 관찰되었다. 덕트와 수중 둔덕이 결합된 Case D에서는 두 구조물의 복합적인 유동 간섭에 의해 덕트 내부의 유속이 더 증가(최대 약 1.49 m/s)하여 뚜렷한 유속 증폭 효과가 관찰되었다. 이러한 효과는 수중 둔덕에 의해 하부로 흐르는 유동이 상부로 밀려 들어, 유동에너지가 덕트 입구로 집중 유입되었기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

Fig. 8은 자유수면을 고려한 비정상 상태(unsteady) 해석 결과인 Case E의 속도 분포를 나타낸 것이다. 자유수면이 유동장 및 덕트 내부 유속 증폭에 미치는 영향을 시각적으로 확인할 수 있다. 덕트 상부 공간을 통과하는 유동이 구조물에 의해 가속되면서 베르누이

Table 4. Time-step convergence test for Case E at $U_0 = 1.0$ m/s

Case	Time-step level	Δt [s]	U [m/s]	p	R	$U_{\Delta t}$ [%]
Case E	Coarse	0.04	1.578	2.12	-0.206 (Oscillatory convergence)	0.81
	Medium	0.02	1.604			
	Fine	0.01	1.598			

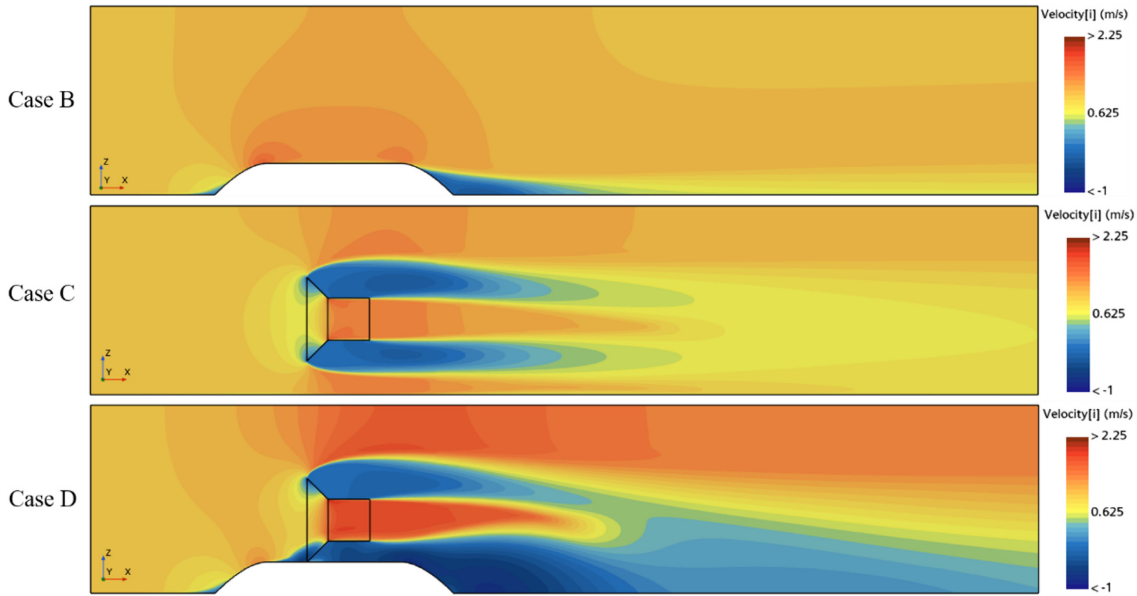


Fig. 7. Velocity distribution of Cases B-D at $U_0 = 1.0$ m/s.

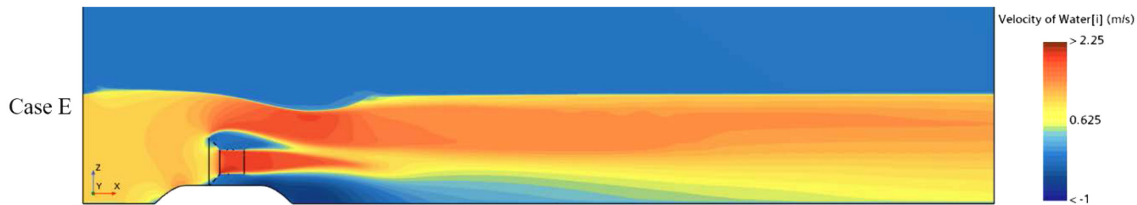


Fig. 8. Velocity distribution of Case E at $U_0 = 1.0$ m/s.

원리에 따른 압력 강하가 발생하였고, 이로 인해 상부 경계면(자유수면)이 오목하게 패이는 자유수면 하강(free surface depression) 현상이 관찰되었다. 이러한 자유수면의 변형은 유동이 구조물 상부 공간으로 우회(bypass)하는 것을 물리적으로 억제하는 제어 경계면 역할을 하게 된다. 덕트 내부 최대 유속은 1.60 m/s로 측정되었고, 결과적으로 자유수면이 없는 폐쇄계(Case D)와 비교해 덕트 내부로 유동을 더욱 집중시켜 타겟 유입부의 유속 증폭률을 극대화하는 요인으로 작용함을 알 수 있다.

3.2 U_0 의 변화에 따른 유속 증폭률 비교

Fig. 9는 U_0 의 변화에 대해 각 Case별로 측정점(지역)에서의 유속 증폭률(U/U_0)을 비교한 것이다. 자유수면을 고려하지 않은 단독 형상 조건(Cases B-C)의 경우, U_0 의 변화와 관계없이 각각 약 1.27, 약 1.30 수준의 일정한 증폭률을 유지하였다. 이는 단일 구조물 조건에서의 유속 증폭 메커니즘이 입력 유속보다는 구조물의 기하학적 형상에 지배적으로 의존함을 의미한다. 덕트와 수중 둔덕의 결합 형상인 Case D의 경우, 평균 증폭률이 약 1.49로 단일 구조물 대비 유속 증폭 성능이 크게 향상되었으나, U_0 에 따른 변동은 미미하였다. 이는 수중 둔덕의 유동 상승 효과와 덕트의 효과가 결합되어 시너지를 발휘하지만, 시스템 고유의 형상에 지배적 영향을 받는 특성은 그대로 유지됨을 시사한다.

한편, 결합 구조물 형상에 자유수면의 영향이 포함된 Case E에서는 U_0 의 증가에 따라 증폭률이 약 1.54에서 1.60으로 약간 상승하는 비선형적 증가 경향이 관찰되었다. 이는 U_0 가 빨라질수록 자유수면의 하강 현상이 심화되어, 구조물 상부로의 유동 우회를 더욱 강하게 억제하기 때문으로 판단된다. 그렇지만, 전체 유속 구간에서 증폭률 변동 폭은 3% 내외로 매우 제한적이었다. 특히, 동일한 결합 구조물인 Case D와 Case E의 비교를 통해, 상부 경계가 닫혀 있는 밀폐계보다 대기로 개방된 자유수면 환경에서 유속 증폭 효과가 확연히 크게 나타난다는 점은 매우 주목할 만하다. 이는 자유수면의 하강이 단순히 유동에 이끌려가는 피동적 현상에 그치는 것이 아니라, 덕트 상부로 우회하려는 유동을 억제하고 내부로 강하게 밀어 넣는 추가 증폭 기제로 작용할 수 있음을 시사한다.

이상의 결과 비교를 통해, 본 연구에서 제안한 구조물 형태는 자유수면의 역동적인 변동이 유속 증폭 효과를 증가시키고 동시에, 기하학적 형상이 주도하는 안정적인 일관된 유속 증폭 성능을 유지할 수 있는 효과적인 설계안이라고 할 수 있다.

3.3 U_0 의 변화에 따른 자유수면 하강 비교

Fig. 10은 자유수면이 존재하는 Case E 조건에서 다양한 유입 속도(U_0)에 따른 자유수면의 변형 양상을 비교한 것이다. 해석 결과, U_0 가 증가함에 따라, 구조물 상부에서 발생하는 자유수면 하강의

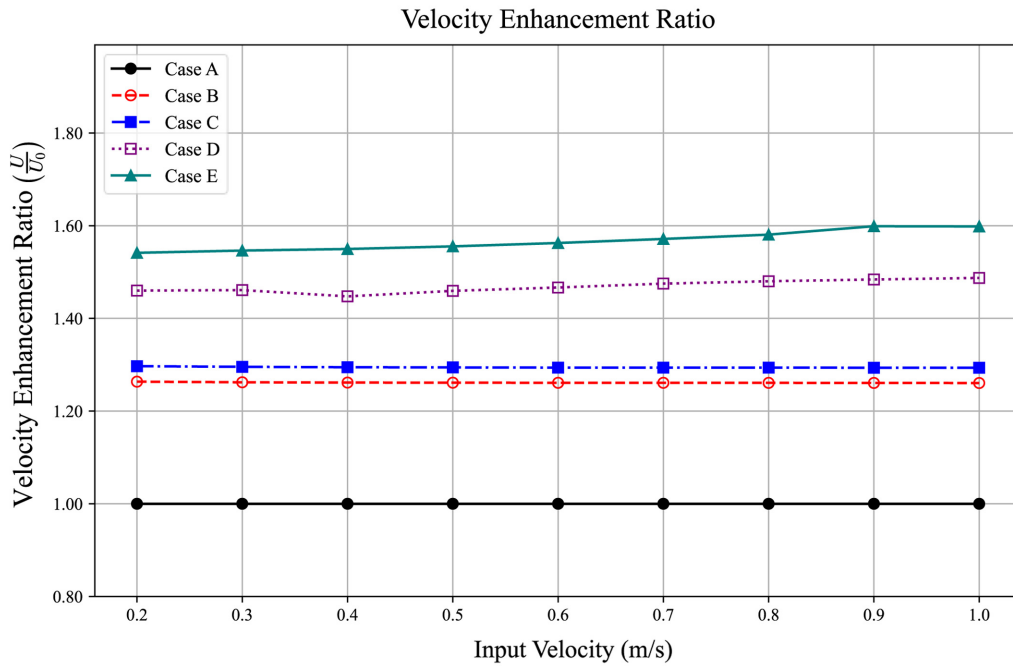


Fig. 9. Variation of velocity enhancement ratio with input velocity for Cases A–E.

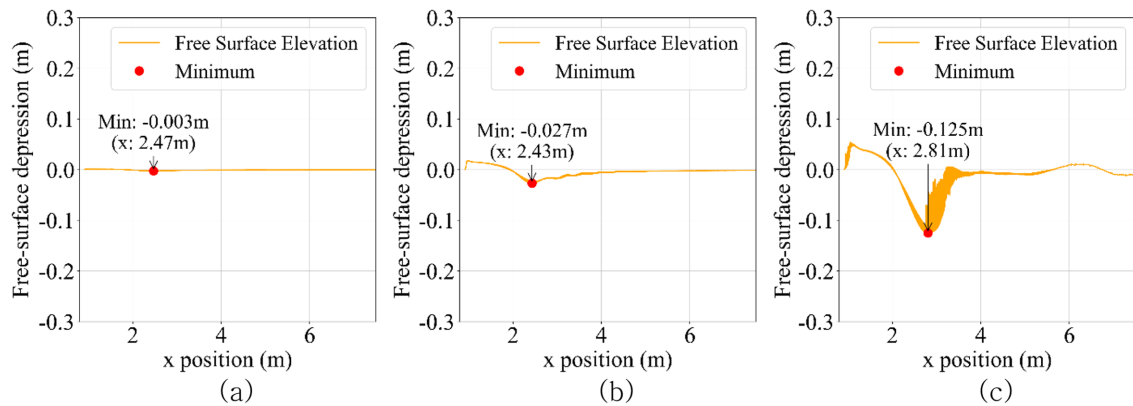


Fig. 10. Free-surface depression at $U_0 = 0.2, 0.6$ and 1.0 m/s.

깊이와 범위가 비선형적으로 증가하는 경향이 관찰되었다. 구체적으로, 최저 수면 높이는 $U_0 = 0.2$ m/s에서 -0.003 m로 미미하였으나, U_0 가 0.6 m/s 및 1.0 m/s로 증가함에 따라 각각 -0.027 m, -0.125 m로 증가하여 깊어지는 현상이 발생하였다. 이와 더불어, U_0 가 증가할수록 최대 자유수면 하강이 발생하는 위치가 구조물의 형상을 따라 하류 방향으로 이동하였다.

이러한 자유수면 하강 현상은 베르누이 원리(Bernoulli's principle)에 의하면 유속의 증가에 의한 정압 감소로 설명할 수 있다. 덕트와 수중 둔덕이 결합된 구조물 상단의 좁아진 유로를 유동이 통과하면서 유속이 급격히 가속되고, 이에 따라 해당 영역의 국부적인 정압이 대기압보다 낮아지게 된다. 따라서, U_0 가 빨라질수록 구조물 상부에서의 유속 가속이 더욱 강하게 일어나므로, 정압 강하 폭이 커져서 대기압과의 압력차이에 의해 자유수면이 더욱 깊어지는 현상이 발생한 것으로 판단된다.

3.4 U_0 의 변화에 따른 최대 자유수면 하강과 자유수면 유무에 따른 유속 증폭률 비교

자유수면 하강 깊이에 따른 유속 증폭률을 분석하기 위해 Fig. 11에 U_0 의 변화에 따른 최대 자유수면 하강 깊이(Fig. 11(a))와, 자유수면 유무에 따른 유속 증폭률의 차이(Fig. 11(b))를 나타내었다. 유입 유속이 0.2 m/s에서 1.0 m/s로 증가함에 따라 최대 자유수면 하강 깊이는 -0.003 m에서 -0.125 m까지 비선형적으로 크게 증가하였다. 하지만 자유수면의 급격한 변동에도 불구하고, 자유수면의 영향에 의한 유속 증폭률은 유속에 관계없이 약 7~8% 수준으로 매우 일정하게 유지되는 경향을 보였다. 이는 자유수면 하강율이 증가하더라도, 덕트 내부의 유동 가속은 덕트의 좁아지는 형상과 단면 변화에 지배적이기 때문으로 판단된다. 따라서, 조석 주기에 따라 유속이 끊임없이 변동하며 자유수면이 존재하는 환경 조건(Case E)에서 유속이 불규칙하게 변하더라도, 자유수면의 급격한 변동이

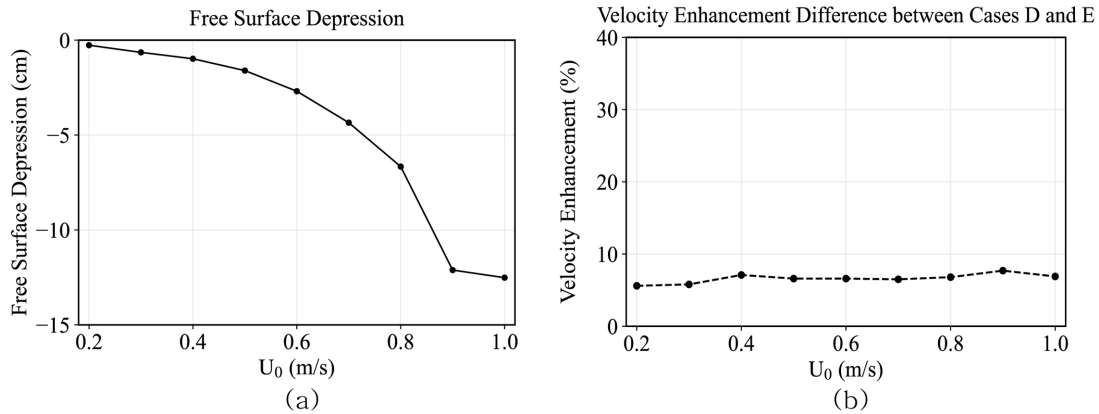


Fig. 11. Maximum free-surface depression and velocity enhancement differences for various input flow velocities.

덕트 내부 유동에 미치는 영향이 제한적일 수 있음을 의미한다. 결과적으로 본 연구에서 제안한 구조물은 실제 해양 환경처럼 유속 변동이 빈번한 조건에서도 자유수면 효과와 결합하여 일관적이고 안정적인 유속 증폭 성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 해상 교량 교각 주변의 저 유속 해역에서 조류 터빈의 발전 성능을 향상시키기 위한 방안으로, 수중 둔덕(Submerged mound)과 덕트(Duct)를 결합한 형태의 유속 증폭 구조물을 제안하였다. 상용 CFD 소프트웨어를 활용하여 수치해석을 수행하였으며, 9가지 유속 조건(0.2~1.0 m/s)과 5가지 형상 조건(Case A~E)에 대해 유속 증폭 효과를 비교 분석하였다. 유속에 따른 유속 증폭 효과는 본 연구의 유속 조건 하에서는 크지 않은 것으로 나타났으며, 자유수면 효과를 포함한 구조물(Case E)에서만 약 3% 정도로 소폭 상승하는 것을 확인하였다. 구조물 조합에 따른 유속 증폭 효과는 단독 구조물 조건인 수중 둔덕(Case B)과 덕트(Case C)의 경우, 유입 유속과 관계없이 각각 약 27%, 30%의 일정한 증폭률을 유지하였다. 두 구조물이 결합된 복합 구조물(Case D)은 단독 구조물보다 상승한, 평균 약 49%의 유속 증폭률을 보였다. 자유수면 효과를 포함한 복합 구조물(Case E)에서는 Case D보다 약 7% 증가한, 최대 60%의 유속 증폭 효과를 확인할 수 있었다. 이는 유동 가속에 따른 정압 강하로 인한 자유수면 하강(Free-surface depression)에 의한 현상으로 판단되며, 덕트 상부로 우회하려는 유동을 억제하고 내부로 강하게 밀어 넣는 추가 증폭 기제로 작용할 수 있음을 시사한다. 유입 유속이 증가할수록 자유수면 하강 깊이가 또한 증가하였으나, 하강 깊이에 따른 유속 증폭률의 증가는 크지 않았다. 따라서, 본 연구에서 제시한 복합 구조물의 유속 증폭 성능은 실험해역의 유입 유속 변화에도 일정한 성능을 유지할 기대할 수 있음을 확인하였다.

본 연구는 조류발전 터빈의 기동 유속(cut-in speed) 확보가 어려운 저 유속 해역에서의 조류발전 시스템 적용 가능성을 제시하였다. 또한, 제안된 유속 증폭 구조물을 통해 터빈의 유입 유속이 최대 60% 까지 증가하였고, 조류발전기의 발전 출력은 유속의 세제곱에

비례하므로 이론적으로 출력이 최대 약 4배까지 향상될 수 있음을 확인할 수 있었다. 이를 해상 교량에 적용할 경우 교량의 조명, 계측 및 유지관리 설비에 필요한 자가 전력을 공급하는 데 기여할 수 있을 것이라 생각된다.

본 연구 결과는 저 유속 해역에 설치되는 친환경 해상 교량용 조류발전 시스템의 설계 및 성능 향상을 위한 기초 설계 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 향후에는 회류 수조에서 모형 실험을 통한 정량적 비교 분석이 수행되어 수치해석 결과에 대한 신뢰성을 검증할 수 있을 것이다. 또한, 유속 증폭 효과를 극대화하기 위한 수중 둔덕과 덕트의 형상, 크기 및 상대 위치에 대한 최적화 연구와, 실제 조류발전 터빈을 적용한 성능 검증 및 실험해역 적용성 평가가 필요하다.

후 기

이 연구는 국토교통부의 재원으로 국토교통과학기술진흥원 연구개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임(과제번호: RS-2024-00401101).

References

- [1] Belloni, C., 2013, Hydrodynamics of Ducted and Open-Centre Tidal Turbines, Ph.D. dissertation, Dept. Eng., Univ. of Oxford, Oxford, UK.
- [2] British Research and Innovation (UKRI), 2018, Design Feasibility Study for a Low Velocity Tidal Stream Turbine, Research Project Report (EP/R000875/1), Engineering and Physical Sciences Research Council (EPSRC), Swindon, UK.
- [3] Encarnacion, J.I., Johnstone, C. and Ordenez-Sanchez, S., 2019, Design of a Horizontal Axis Tidal Turbine for Less Energetic Current Velocity Profiles, J. Mar. Sci. Eng., 7(7), 197.
- [4] Fraenkel, P.L., 2002, Power from marine currents, Proc. Inst. Mech. Eng. A: J. Power Energy, 216(1), 1-14.
- [5] Franke, J., Hellsten, A., Schlünzen, H. and Carissimo, B., 2007,

- Best Practice Guideline for the CFD Simulation of Flows in the Urban Environment, Meteorological Institute, University of Hamburg, Hamburg, Germany.
- [6] International Towing Tank Conference, "Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures," ITTC – Recommended Procedures and Guidelines, 7.5-03-01-01, Rev 02, 2008.
- [7] International Towing Tank Conference (ITTC), Practical Guidelines for Ship CFD Applications (ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-02-03, Rev. 02), <https://www.ittc.info/>, 2024 (accessed 2026.07.03).
- [8] International Towing Tank Conference (ITTC), Practical Guidelines for Ship Resistance CFD (ITTC Recommended Procedures and Guidelines 7.5-03-02-04, Rev. 02), <https://www.ittc.info/>, 2024 (accessed 2026.07.03).
- [9] Kim, J.B. and Koo, W., 2025, A Study on the Numerical Analysis of the Change of Internal Flow Velocity with Hill Topography in Shallow Water Flow Field, in proc. of KOSMEE Meeting, Busan, Korea.
- [10] Kim, J.B., Jeon, J.H. and Koo, W., 2025, Effect of Duct Length on Flow Velocity Amplification in Tidal Current Turbines, in proc. of KOSMEE Meeting, Busan, Korea.
- [11] Korea Institute of Energy Research (KIER), 2022, New Energy Outlook 2022: A Pathway to Net Zero, KIER, Daejeon, Korea.
- [12] Mehmood, N., Zhang, L. and Khan, J., 2012, Diffuser Augmented Horizontal Axis Tidal Current Turbines, Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol., 4(18), 3522-3532.
- [13] Mejia-Olivares, C.J., Haigh, I.D., Wells, N.C., Coles, D.S., Lewis, M.J. and Neill, S.P., 2018, Tidal-Stream Energy Resource Characterisation for the Gulf of California, México, Energy, 156, 481-491.
- [14] Ministère de la Transition Écologique, 2020, Stratégie Nationale Bas-Carbone (National Low-Carbon Strategy), République Française, Paris, France.
- [15] Ministry of Oceans and Fisheries (MOF), 2020, Tidal Current Power: Energy with Less Weather Impact and Capable of Planned Power Generation, <https://www.mof.go.kr/doc/ko/selectDoc.do?docSeq=32315&menuSeq=382&bbsSeq=16> (accessed 2026.06.23).
- [16] Nasab, N.M. and Kilby, J., 2021, Feasibility Study: Effect of Tidal Turbines Cut-in Speed for Power Generation in New Zealand, Chem. Eng. Trans., 88.
- [17] Park, J.S., Park, J.S., Lee, C.Y., Ko, D.H., Choi, H.W., Yi, J.H., Jung, M.H. and Seo, H.K., 2018, IEC TS62600-201 Tidal stream energy resource assessment and characterization: Applied to assessment of tidal stream energy resource in the Korean peninsula, in proc. of the Korean Society for Marine Environment and Energy, Jeonnam, Korea, 177-178.
- [18] Pena, B. and Huang, L., 2021, A review on the turbulence modelling strategy for ship hydrodynamic simulations, Ocean Eng., 241, 110082.
- [19] Roache, P.J., Ghia, K.N. and White, F.M., 1986, Editorial Policy Statement on the Control of Numerical Accuracy, J. Fluids Eng., 108(1), 2.
- [20] Shives, M.R., 2011, Hydrodynamic Modeling, Optimization and Performance Assessment for Ducted and Non-ducted Tidal Turbines, Master's thesis, Dept. Mech. Eng., Univ. of Victoria, Victoria, Canada.
- [21] Siemens Digital Industries Software. (2024). Simcenter STAR-CCM+ User Guide (Version 2402). Siemens.

Received 8 July 2026

Revised 9 July 2026

Accepted 20 July 2026