수문 설치에 따른 동삼해수천의 유속 변동 특성

Variability of flow velocity induced by Dongsam Seawater Stream Floodgate installation

진승환* · 김동하* · 임학수* · 이희준**

*한국해양과학기술원 해양재난·재해연구센터

**한국해양과학기술원 해저활성단층연구단

Seunghwan Jin* · Dongha Kim* · Hak Soo Lim* · Hee Jun Lee**

*Marine Disaster Research Center, KIOST, Busan, Korea

**Marine Active Fault Research Unit, KIOST, Busan, Korea

Abstract

The Dongsam seawater stream on a reclaimed land flows by tidal forcing. The flow is generally slow, especially in the central portion of the stream because the outflow and inflow each occurs at both ends of the stream simultaneously. As a result, sediments accumulate constantly with the deteriorating water quality. In this study, field observation was conducted using Aquadrifter and Aquadopp and analyzed for the analysis of the flow velocity in the stream. The computational fluid dynamics (CFD) modeling was run with and without Seawater Stream Floodgate to predict the variability of the flow. The flow velocity of the Dongsam Seawater Stream was recorded in the range of 0.01 ~ 0.13 m/s, and the tidal range was within 1.0 m. According to the simulation, the flow velocity could increase remarkably with two floodgates used to force the stream to flow unidirectionally (toward Korea Maritime & Ocean University). The flow velocity change rate at each point is recorded -97 ~ 638% at P1 (front of Malfunction Floodgate near Busan Int. Cruise Terminal), -89 ~ 659% at P2 (back of Malfunction Floodgate near Busan Int. Cruise Terminal), -100 ~ 1198% at P3 (central channel), and at P4 (toward Korea Maritime & Ocean University) was -100 to 1163%, and Case III-a showed the largest flow velocity rate increase in the central part. Therefore, if two Floodgates are installed and flowed out toward Korea Maritime & Ocean University, the flow velocity rate of the Stream can be increased.

Keywords : Dongsam seawater stream, Floodgate, Aquadrifter, Aquadopp, Computational fluid dynamics

1. 서론

부산광역시 영도구 동삼혁신지구에 위치한 동삼해수천은 매립지 조성으로 형성된 인공해수천으로 인근 주민들의 친수공간과 다양한 해양생물의 서식처로 이용되고 있다(Kookje, 2019). 동삼해수천의 흐름은 조차에 의하여 발생되며, 부산국제크루즈터미널과 한국해양대학교 방면으로 유입·유출된다. 그러나 여름철 하천 유사 유입으로 인한 퇴적물 증가로 해수의 순환이 원활하지 않으며, 생활하수 및 오수가 유입되어 악취가 발생하고 있다(Ko, 2014). 또한 고장 난 수문이 해수순환을 방해하여 수질악화는 가속되고 있다(Yeongdo-gu, 2016)(Fig. 1). 이로 인하여 매년 많은 예산을 투자하는 수질개선사업 시행에도 불구하고 수질은 지속적으로 악화되고 있는 실정이다. Kim(2014)과 Yoo *et al.*(2017)은 동삼해수천의 생물정화에 미생물을 이용하는 기술을 연

구하였다. 또한 Yeo *et al.*(2010)은 인공 해수천의 흐름 특성에 대하여 FLOW-3D를 이용한 3차원 수치해석을 실시하여 흐름 특성과 조류생성과의 상관성을 분석하였다. 그러나 기존 연구들은 인공해수천의 물리 관측자료가 없으며, 수질개선에 대한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본 연구는 동삼해수천 중앙부의 유속증가와 수질개선을 위하여 시나리오 별로 Aquadopp와 소형 GPS 표류부이(Aquadrifter)를 이용하여 흐름특성을 파악하였으며, 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics; CFD) 해석을 실시하여 유속을 증가시키기 위한 방안을 제시하였다.

2. 재료 및 방법

본 연구대상지인 동삼해수천은 총 길이가 2,108m이며, 약 482m만큼 복개되어져 있다. 폭은 12~16m로 부산국제크루

Table 1. Case-specific number of floodgate and seawater outflow direction

Number of Floodgate	CASE	Ebb Outflow Direction
0	I	a Two-way (Malfunction Floodgate)
		b Two-way
1	II	a Korea Maritime & Ocean University
		b Busan International Cruise Terminal
2	III	a Korea Maritime & Ocean University
		b Busan International Cruise Terminal

Fig. 1. Dongsam seawater stream and Malfunction floodgate in the study area

즈터미널에서 한국해양대학교로 갈수록 폭이 좁아지는 형태이다(Yeongdo-gu, 2020).

해수의 유입 · 유출 방향에 따른 동삼해수천의 흐름특성을 파악하고 유출방향에 따른 유속 변동을 파악하기 위하여 시나리오를 Table 1과 같이 설정하였다. 수문 설치 개수에 따라서 Case I (수문 0개), Case II (수문 1개), Case III (수문 2개)로 구분하였으며, 유출방향에 따라서 a(한국해양대학교 방면)와 b(부산국제크루즈터미널 방면)로 구분하였다. 한편, Case I -a는 고장 난 수문을 고려한 동삼해수천의 현재 상태이며, Case I -b는 고장 난 수문을 제거한 상태이다.

2.1 관측

본 연구에 사용된 Aquadrifter는 크기가 작아 얕은 지역에서 표층흐름을 관측하는데 적합하게 고안되었으며, 2.4 GHz

의 주파수 대역을 사용하며, 2.5 m 정확도의 GPS를 사용한다. 또한 수신국으로부터 1초단위로 날짜, 시간, 위치정보를 내부 메모리에 저장한다(Lim *et al.*, 2017). 따라서 본 연구에서는 Aquadrifter와 도플러방식의 층별 유속계인 Aquadopp을 사용하였다.

수문 설치에 따른 유속 분포를 파악하기 위하여 Case I -a와 Case II -a, b에 대하여 만조와 간조 때 관측을 실시하였다. 각 Case별 Aquadrifter의 관측기간을 살펴보면, Case I -a는 2020.03.30에 관측하였으며, Case II -a, b는 2020.03.23~26(4일) 동안 3구간에서 유속을 관측하였다. 따라서 Case I -a는 동삼해수천의 현재 상태로서 해수 유입 · 유출은 양방향으로 발생한다(Fig. 1). Case II -a는 3월 23일부터 24일까지 2일 동안 관측하였으며, 임시 수문을 부산국제크루즈터미널 방면에 설치하여 한국해양대학교 방면으로 유입 · 유출시켰다(Fig. 2(a)). Case II -b는 3월 25일부터 26일까지 2일 동안 관측하였으며, 임시 수문을 한국해양대학교 방면에 설치하여 부산국제크루즈터미널 방면으로 유입 · 유출시켰다(Fig. 2(b)). Aquadopp은 2020.03.20~30(11일) 동안 부산국제크루즈터미널(st.1)과 한국해양대학교(st.2) 방면에서 각각 조위와 유속을 관측하였다(Fig. 2).

2.2 전산유체역학(CFD)

동삼해수천의 Case별 유속변동을 계산하기 위하여 ANSYS-CFX를 사용하였다. 지배방정식은 Eqs. (1)와 (2)와 같이 각각 연속방정식과 unsteady Navier-Stokes 방정식이다. 본 해석에서 사용된 유체는 비압축성(incompressible), 점성(viscous), 뉴턴 유체(Newtonian fluid)로, 밀도(density)와 온도(temperature)는 각각 $1,025 \text{ kg/m}^3$ 과 15°C 이다.

$$\rho(\nabla \cdot \vec{V}) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 \vec{V} \quad (2)$$

동삼해수천은 Fig. 3과 같이 3D 모델링하였으며, 격자 3,446,765개(Max. size : 0.4m)로 구성하였다. 격자의 직교성과 비틀림은 Table 2와 같이 각각 0.757(Very good)과 0.243(Excellent)으로 구성되었다.

Fig. 2. Location of temporary floodgate of Dongsam seawater stream

Fig. 3. Modeling and Flow velocity extraction point(P1~P4) of Dongsam seawater stream

Table 2. Mesh quality recommendations (form ANSYS Inc., 2013)

Quality	Unaccepted	Bad	Accept.	Good	Very good	Excellent
Orthogonal quality (OQ)	0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00
Skewness (Skw)	0.98-1.00	0.95-0.97	0.80-0.94	0.50-0.80	0.25-0.50	0-0.25

유출조건은 약최고고조위 1.226m에서 약최저저조위 0m로서, 총 11,737m³(0.543m³/s) 유출량을 고려하였다. 유속의 추출 지점은 고장 난 수문의 전면부(P1) 및 후면부(P2), 동삼해수천 중앙부(P3), 한국해양대방면(P4) 지점의 기본수준면에서 추출하였다. 따라서 총 3개의 썰물 유출 시나리오에 대하여 CFD해석을 실시하였으며, Case II, III의 최대 유속 상승률은 Case I -a와 비교하여 산정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 관측

Case I -a와 Case II -a, b에 대한 Aquadrifter의 관측 결과를 Fig. 4와 Table 3에 나타내었다. Fig. 4는 Aquadrifter의 이동 경로를 google map에 나타낸 것이며, Table 3은 Aquadrifter의 이동거리와 시간을 이용하여 산정된 표층 유속 결과를 나타낸 것이다. Aquadrifter의 유속분포를 살펴보면, Case I -a의 유속은 0.01~0.10m/s의 범위를 나타내었다. Case II -a와 b는 각각 0.04~0.17m/s와 0.03~0.11m/s 범위를 나타내었다. 모든

(a) Case I -a : low tide

(b) Case I -a : flood tide

(c) Case II -a : low tide

(d) Case II -a : flood tide

(e) Case II -b : low tide

(f) Case II -b : flood tide

Fig. 4. Aquadrifter observation result of (a) Case I -a : low tide, (b) Case I -a : flood tide, (c) Case II -a : low tide, (d) Case II -a : flood tide, (e) Case II -b : low tide and (f) Case II -b : flood tide in Dongsam seawater stream

Case는 유·출입부에서 가장 큰 유속을 나타내었으며, 특히 현재 상태인 Case I -a보다 임시 수문을 설치한 Case II -a, b가 유·출입부에서 최대 0.07m/s 만큼 더 큰 유속을 나타내었다. 또한 중앙부의 유속은 최대 0.06m/s 만큼 더 큰 유속을 나타내었다. Aquadrifter의 이동경로를 살펴보면, 현재 동삼해수천은 간조시 한국해양대보다 주로 부산국제크루즈 터미널로 유출이 발생하고 있다(Fig. 4(a)). 이는 부산국제크루즈터미널 방면이 한국해양대방면보다 약 5m 큰 하폭의 영향으로 판단된다. 또한 만조시 불규칙한 흐름을 나타내었으며(Fig. 4(b)), 중앙부의 퇴적물과 고장 난 수문으로 인하여 흐름이 방해되는 것으로 판단된다. 그러나 임시 수문

을 설치한 Case II -a, b의 흐름은 조류의 흐름과 같은 양상으로 나타났다(Fig. 4(c)-(f)). 따라서 수문을 설치하여 동삼해수천의 흐름을 일정하게 유지할 수 있으며 유속을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

Aquadopp의 조위 및 유속관측 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구기간동안 동삼해수천의 조위는 1.0m 내로 관측되었다(Fig. 5(a)). 부산 조위관측소의 결과와 최대 0.19m만큼 차이가 났으며, 이는 고장 난 가동보와 퇴적물 등이 동삼해수천의 흐름을 방해하는 것으로 판단된다. 만조시 관측된 유속을 살펴보면, Case별로 Aquadrifter와 유사한 형태를 나타내었다(Fig. 5(b)). 한국해양대 방면에서 해수가 유입하

Table 3. Measurement result of Surface flow velocity using Aquadrifter in Dongsam seawater stream

CASE	Tide	Number	Drop time (hh:mm)	Collect time (hh:mm)	Observation time (s)	Distance (m)	Surface Velocity (m/s)
I	a	1	13:32	15:21	6562	643.42	0.10
		2	10:35	15:08	16386	550.51	0.03
		3	-	-	-	-	-
	High water	1	17:30	18:24	3248	149.01	0.05
		2	17:34	18:35	3680	223.6	0.06
		3	17:37	18:28	3075	45.18	0.01
	low water	1	11:00	12:41	6037	241.16	0.04
		2	11:04	13:22	2544	401.77	0.05
		3	12:59	13:42	2544	424.93	0.17
II	a	1	17:49	18:52	3772	136.63	0.04
		2	17:42	18:48	3948	299.15	0.08
		3	17:34	18:31	3431	332.48	0.10
	low water	1	13:23	13:54	1852	200.19	0.11
		2	13:33	14:21	4061	156.73	0.04
		3	13:42	14:32	3035	103.28	0.03
	b	1	18:33	19:31	3462	304.59	0.09
		2	18:28	19:04	2159	121.57	0.06
		3	18:13	19:22	4120	158.7	0.04

(a) Dongsam seawater stream tide

(b) Dongsam seawater stream flow velocity

Fig. 5. Aquadopp observation results of (a) Dongsam seawater stream tide and (b) Dongsam seawater stream velocity

는 경우 유속은 Case I -a에서 최대 0.33 m/s 나타났다. 또한 임시수문이 설치된 Case II -b의 경우에는 0.2 m/s 이하로 낮은 유속을 나타내었다. 따라서 임시수문을 한 개를 설치하여 한쪽방향으로 유입시키는 경우보다 양쪽으로 유입시킬 때 큰 유속을 나타내었다.

3.2 전산유체역학(CFD)해석 결과

Case I, II, III의 CFD해석 결과를 Fig. 6에 나타내었으며, Case I -b대비 Case II, III의 유속변동률을 Table 4에 나타내었다.

Fig. 6. Flow velocity variation of (a) Case I -a, (b) Case I -b, (c) Case II -a, (d) Case II -b, (e) Case III-a and (f) Case III-b according to the ebb flow direction and the number of floodgate installed

Table 4. Maximum flow velocity change rate by case in Dongsam seawater stream

Number of floodgate	CASE	Maximum flow velocity change rate (%)				
		P1	P2	P3	P4	
1	II	a	-97	-89	116	107
		b	131	178	-100	-100
2	III	a	222	606	1198	1163
		b	638	659	88	-97

3.2.1 Case I -a, b

Case I -a의 각 지점별 평균 유속은 0.06 m/s(P1), 0.10 m/s (P2), 0.11 m/s (P3), 0.16 m/s(P4)로 나타났다(Fig. 6(a)). 특히 2,400초에 P3지점이 증가하는 것을 나타내었으며, 이는 부산국제크루즈 터미널에 위치한 고장 난 수문으로 인하여 일정 수위가 되면 유출의 흐름이 하폭이 좁은 한국해양대 방면으로 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 Case I -b와 같이 고장 난 수문을 제거했을 경우에 유속이 증가하였으며, 각 지점별 유속은 최대 0.15 m/s(P1, P2), 0.31 m/s(P3), 0.29 m/s(P4)만큼 증가하였다(Fig. 6(b)).

3.2.2 Case II -a, b

Case II -a와 b의 각 지점별 평균 유속은 각각 0.03 m/s(P1), 0.05 m/s (P2), 0.40 m/s (P3), 0.36 m/s(P4)와 0.21 m/s(P1), 0.21 m/s (P2), 0.04 m/s (P3), 0.001 m/s(P4)로 나타났다(Fig. 6(c), (d)). 그 결과, Case II -a의 P1과 P2지점은 각각 97%, 89%만큼 감소하였으며, P3와 P4는 각각 116%, 107%만큼 증가하였다. Case II -b의 P1과 P2지점은 각각 131%, 178%만큼 증가하였으며, P3와 P4지점은 최대 100%만큼 감소하였다. 따라서 수문이 1개인 경우 동삼해수천의 중앙부(P3)의 유속은 Case II -a일 때 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 Case II -a, b는 전 구간에서 유속이 증가하지 않는 것으로 나타났다.

3.2.3 Case III -a, b

Case III -a와 b의 각 지점별 평균 유속은 각각 0.13 m/s(P1), 0.25 m/s (P2), 1.79 m/s (P3), 1.61 m/s(P4)와 0.94 m/s(P1), 0.92 m/s (P2), 0.42 m/s (P3), 0.03 m/s(P4)로 나타났다(Fig. 6(e), (f)). Case III -a는 모든 지점에서 크게 증가하였으며, 특히 P3와 P4지점은 각각 1198%, 1163%만큼 크게 증가하였다. Case III -b는 P1과 P2에서 각각 638%, 659%로 크게 증가하였으며, P3지점은 88% 증가하였다. 그러나 P4지점은 97%만큼 감소하는 것으로 나타났다. 따라서 Case III -a가 중앙부(P3)의 유속을 가장 크게 증가시키는 것으로 나타났으며, 수문을 두 개 설치하여 최대 조석차(1.226m)를 이용하면 단 시간에 유속을 크게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 동삼해수천 중앙부의 유속증가와 수질개선 방안을 마련하기 위하여 현장관측과 전산유체역학(CFD)해석을 Case별로 수행하였다.

현재 동삼해수천은 0.01m/s의 낮은 중앙부 유속과 고장난 수문의 흐름 차단으로 인하여 퇴적물 증가 및 수질이 악화되고 있다. 따라서 유속을 높이기 위하여 임시 수문을 부산국제크루즈터미널 방면(Case II -a)과 한국해양대학교 방면(Case II -b)에 설치하여 관측하였다. 그 결과, Case II -a와 Case II -b의 중앙부 최대 유속은 각각 0.17m/s와 0.06m/s로서

Case II -a가 더 큰 유속을 나타내었다. 따라서 Aquadrifter의 관측 결과, 수문을 부산국제크루즈터미널 방면에 설치하여 한국해양대학교 방면으로 해수 유통을 유도하면 동삼해수천 중앙부의 유속을 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다. CFD해석 결과에서도 Case II -a가 중앙부의 유속을 더 증가시키는 것으로 나타났으며, Case II -b는 유속이 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 Case II는 동삼해수천의 전 구간의 유속을 증가시키지 못하는 것으로 나타났다. 또한 Aquadopp의 유속 관측 결과, 수문을 한 개 설치하여 한 방향으로 유입시킬 때 양방향 유입보다 낮은 유속을 나타내었다. Case III은 Case III -b의 P4지점을 제외하고 모든 구간에서 큰 유속 증가율을 나타냈다. 특히 Case III -a는 모든 구간에서 200% 이상의 증가율을 나타냈으며, 중앙부(P3)의 유속은 1198%만큼 크게 증가하였다. 따라서 동삼해수천의 중앙부 유속의 증가와 수질관리를 위한 원활한 해수유통을 위해서는 Case III -a와 같이 양방향에 수문을 설치하여 해수를 양방향으로 유입시키고 최대조석차를 이용하여 한국해양대학교 방면으로 배출해야 하는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 동삼해수천의 수질개선을 목적으로 수문과 최대조석차를 이용하여 유속을 높이는 방법을 제안하였다. 현재 동삼해수천은 종합정비사업에 따른 수문설치 공사를 추진 중에 있으며, 인근 주택개발과 친수공간 정비로 부유물질이 계속 유입되고 있다. 따라서 향후 연구에서는 수문 설치에 따른 해수유동 변화와 추가 오염원의 정확한 유입경로를 파악하고 수질과 퇴적물 분석 및 예측을 통하여 환경개선과 친수공간 기능을 지원할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부와 한국산업기술진흥원의 “지역혁신클러스터육성사업(P0004797)”으로 수행된 연구결과입니다. 또한 본 연구는 산림청(한국임업진흥원) 산림과학기술 연구개발사업 “해양치유 효과 증진을 위한 웨어러블 연동기술 개발(2021410B10-2125-0101)”의 지원에 의하여 이루어진 것입니다.

References

- ANSYS-Inc. (2013). ANSYS-CFX, Release 15.0.
- Kim, S.H. (2014). “Bioremediation of Polluted Constructed Sea Stream Using Bioaugmentation of a Microbial Consortium.” Master's Thesis, Korea Maritime & Ocean University, Busan.
- Ko, S. C. (2014). “Eco-friendly water quality management plan for artificial seawater spring in Yeongdo Innovation District in Korea.” Busan Green Environment Center, 153p.
- Kookje (2019). The stinking Dongsam seawater Stream will be reborn as a water-friendly park, Kookje newspaper, Busan, <http://>

- www.kookje.co.kr/news2011/asp/newsbody.asp?code=0300&key=20190805.99099001921 (last date accessed: 25 Oct 2021)
- Korea Institute of Ocean Science and Technology (2020). "Numerical Flow Analysis of Dong-Sam Seawater Stream." Report 10, KIOST Publication BSPI56150-12392-1, Yeongdo-gu in Busan, 4p.
- Lim, H. S., Kim, M. and Shin, J. S. (2017). "Surface current measurements using lagrangian Drifters in Anmok." *Journal of Coastal Disaster Prevention*, Vol. 4, pp. 245-253.
- Yeo, C. G., Jeong, S. I., Lee, S. O. and Kim, M. I. (2010). "Correlation Analysis between Hydraulic Characteristics and Algal bloom in an Artificial Seawater Channel." *Journal of Korea Water Resources Association*, pp. 1044-1048.
- Yeongdo-gu Council (2016). Questions and Answers for the 255th Extraordinary Session 'Rep. Joo-Hyun Ahn', *Yeongdo-gu Council*, Busan, <https://www.yeongdo.go.kr/council/01221/01224.web?idx=173466&amode=view> (last date accessed: 26 Oct 2021)
- Yoo, J., Kim, I. S., Kim, S. H., Ekprghere, K. I., Chang, J. S., Park, Y. I. and Koh, S. C. (2017). "Eco-friendly and efficient in situ restoration of the constructed sea stream by bioaugmentation of a microbial consortium." *Korean Journal of Microbiology*, Vol. 53, pp. 83-96.