

## 24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지 펌핑 성능에 대한 고찰

서장원\* · 윤정인\*\* · 이경우\*\*\* · 이원주\*\*\*\* · 박호용\*\*\*\*\* · 최수정\*\*\*\*\* · 최재혁\*\*\*\*\*†

\* 한국지질자원연구원 책임기술원, \*\* 한국조선해양기자재연구원 책임연구원, \*\*\* 탐솔루션 이사,  
\*\*\*\* 한국해양대학교 교수, \*\*\*\*\* 선박해양플랜트연구소 선박연구본부, \*\*\*\*\* 한국해양대학교 대학원

## A Study on Bilge Pumping Performance of 24,000TEU class Container Ship

Jang-Won Seo\* · Jeong-In Yun\*\* · Kyoung-Woo Lee\*\*\* · Won-Ju Lee\*\*\*\* · Hoyong Park\*\*\*\*\* ·  
Su-Jeong Choe\*\*\*\*\* · Jae-Hyuk Choi\*\*\*\*\*†

\* Principal Engineer, Korea institute of Geoscience and mineral resources, Daejeon, 34132, Korea

\*\* Principal Researcher, Korea Marine Equipment Research Institute, Busan, 49111, Korea

\*\*\* Director, Team Solution Co., Ltd. Busan, 47588, Korea

\*\*\*\* Professor, Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan, 49112, Korea

\*\*\*\*\* Researcher, Korea research institute of ship &amp; ocean engineering Advanced Ship Research Division, Daejeon, 34103, Korea

\*\*\*\*\* Graduated student, Graduate school of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

**요 약 :** 본 연구에서는 전장이 400m인 24,000TEU급 컨테이너선박을 대상으로 선박 내 빌지펌핑의 성능에 대한 케이스 스터디를 수행하였다. 본 연구의 대상인 24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지시스템의 경우 선급의 규칙에 맞게 설계되었지만, 선박 내 설치되어 있는 빌지펌프의 정격유량 및 최대유량 조건에서도 SOLAS Reg.II-1/35-1의 2 m/s 요건을 만족시키지 못하였다. 특히 1번 ~ 4번 화물창에 대해, 해수로 가득차 있다고 가정한 상태에서 해수를 모두 배출하는 동안에 빌지 주관에서 평균유속을 계산할 결과, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창은 평균유속이 2 m/s 미만으로 기준에 적합하지 않은 것으로 나타났다. 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 2번, 3번 및 4번 화물창의 150A 빌지 지관을 200A 배관으로 교체하여 계산을 수행하였으며, 그 결과 화물창 내의 해수를 모두 배출하는 동안의 빌지 주관에서의 해수평균유속이 각각 2.479m/s, 2.476m/s 및 2.459m/s 로 기준을 만족시키는 것을 알 수 있었다.

**핵심어 :** 빌지펌핑성능, 대형 컨테이너선박, 빌지시스템, 빌지주관 평균유속, 유동에너지손실

**Abstract :** *Herein, a case study was conducted on the bilge pumping performance of a 24,000TEU class container ship with an overall length of 400m. Although the bilge system of the 24,000TEU class container ship was designed in accordance with the rule requirements of the Classification Society, the bilge system did not satisfy the 2 m/s requirements of SOLAS Reg.II-1/35-1 under the rated flow rate and maximum flow rate conditions of the bilge pump installed in the ship. In particular, assumptions were made that No.1 ~ No.4 cargo holds were flooded and filled entirely by sea water and the evaluation of bilge pumping performance had been performed for No.1 ~ No.4 cargo holds. According to the evaluation results of the , the mean water velocity at the main bilge pipe for No.2, No.3, and No.4 cargo holds did not meet the 2 m/s criterion. To resolve this problem, in this study, the branch bilge pipe in each cargo hold was changed from 150A to 200A and the mean water velocity at the main bilge pipe for No.2, No.3, and No.4 was calculated as 2.479m/s, 2.476m/s, and 2.459m/s, respectively.*

**Key Words :** *Bilge Pumping Performance, Large Container Ship, Bilge System, Mean Water Speed at Main Bilge Pipe, flow energy loss*

\* First Author : igorseo@kigam.re.kr

† Corresponding Author : choi\_jh@kmou.ac.kr, 051-410-4257

## 1. 서론

빌지시스템은 선박의 가장 중요한 안전시스템 중의 하나이다. 일반적으로 선박에는 2가지 빌지시스템이 설치된다.

첫 번째 빌지시스템은 SOLAS에 따라 설치되는 것으로서, 선박의 복원성 확보를 위해 침수된 구획 내에 축적된 물을 빠른 시간안에 선박 외부로 배출하는 빌지시스템으로 일반적으로 SOLAS 빌지라고 부른다.

두 번째 빌지시스템은 MARPOL에 따라, 기관실 내에 있는 유성빌지(Oily Bilge)를 15 ppm 이하로 정화하여 선박 외부로 배출하는 빌지시스템으로 일반적으로 MARPOL 빌지라고 부르며, 본 연구는 SOLAS 빌지에 대한 연구이다.

빌지시스템과 관련된 요건은 SOLAS Regulation II-1/35-1규칙에서 규정하고 있으며, 충분한 용량의 펌프를 설치하도록, 2m/s 요건을 정하고 있으며, 충분한 크기의 배관을 설치하도록 빌지주관의 최소직경요건을 규정하고 있다.

Bilge Pumping System에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔다. 총톤수 500톤급 페리선에 대해, 상용프로그램인 Autopipe를 이용하여 빌지 시스템의 각 배관 및 배관의 서포트에 발생하는 응력을 검토한 연구가 있다(Pawara et al., 2021). 또한, 압력기반모델(Pressure-dependent Model)의 선박 적용가능성을 검토하기 위해, 미국환경보호청(EPA)의 공개 software인 EPANET을 이용하여 선박의 소화계통배관과 빌지시스템용 배관의 설계를 수행한 바가 있다(Perez et al., 2020). 그리고, 복잡한 선박 내부 구조에서 빌지시스템용 배관을 자동으로 배치하는 방법에 대한 연구가 수행된 바가 있다(Tan et al., 2018; Bian et al., 2022; Jiang et al., 2015).

하지만, 빌지시스템 관련 요건의 도입 취지인 Bilge Pumping Performance에 대한 연구는 Lee et al.(2021)의 연구 이외에 없는 것으로 파악되고 있다.

Lee et al.(2021)은 14,000TEU class 컨테이너 선박에 대한 연구를 통해, 현재 국제항해 선박에 적용되고 있는 빌지시스템 관련 선급의 요건은 SOLAS Regulation II-1/35-1 규칙의 도입 취지를 만족시키지 못하고 있으며, 특히, 대형 선박의 경우, 대부분의 상황에서 2m/s 요건을 만족시키지 못하고 있다는 점을 지적하였으며, 이에 대한 대안으로 아래 3가지의 설계 기준을 제안하였다.

- (1) The actual internal diameter of the bilge main should not be less than the required internal diameter of the bilge main according to SOLAS Regulation II-1/35-1.3.9. (내경기준)
- (2) Each bilge pump should be of sufficient capacity with the water velocity to be greater than 2 m/s at the actual internal diameter of bilge main. The study led to the belief that Class Rules should be formulated in such a way that the

internal diameter of the actual main bilge and the bilge pump capacity are addressed as dependent variable, not as independent variables. (중속기준)

- (3) The bilge pumping system should ensure that the average water speed at the bilge main is not less than 2 m/s during the discharge of the flooded water from the flooded compartment where it is expected to take the longest time to discharge all flooded water. In addition, when calculating the water speed at the bilge main during discharge of flooded water, the flow energy loss is calculated using Darcy - Weisbach equation and Colebrook - White's equation, and pipe wall roughness of 1.0mm should be applied. (2 m/s 기준)

Lee et al.(2021)의 연구결과에 따르면, 빌지시스템이 SOLAS 요건의 도입 취지에 맞지 않게 설계되는 것은 최근에 선박의 대형화 되면서, 빌지펌프의 요구용량이 펌프의 최대 용량과 비슷하게 설정되고 있으며, 빌지시스템의 배관이 길어짐에 따라 배관에서 발생하는 유동에너지 손실이 커지고 있기 때문인 것으로 파악된다.

따라서, 본 연구에서는 최근에 건조되고 있는 선박 중에서 가장 큰 선박으로서 전장이 400 m인 24,000TUE급 컨테이너 선박의 빌지펌핑성능(Bilge Pumping Performance)에 대한 Case Study를 수행하였다.

## 2. 컨테이너 선박 및 빌지시스템의 사양

Table 1은 본 연구에서 사용된 24,000TEU급 컨테이너 선박 및 선박에서 설치되어 있는 빌지시스템의 사양을 나타낸 것이다. 다만, Table 1에서 선박의 사양은 계산상의 편의 등을 위해 실제 제원과 약간 차이가 있다.

해당 선박의 빌지시스템은 선급의 규칙에 적합하게 설계되었지만, Lee et al.(2021)이 지적한 선급 규칙의 논리적인 오류로 인해 중속기준을 만족시키지 못하고 있기 때문에, 빌지펌프의 정격유량 및 최대유량에서도 빌지주관에서의 유속이 2 m/s를 만족시키지 못하고 있다(Lee et al., 2021).

본 연구는 Lee et al.(2021)이 제시한 설계 기준인 2m/s 기준에 따라 24,000TEU급 컨테이너 선박의 빌지펌핑성능을 검토하는 것이기 때문에, 1개의 화물창이 완전히 침수된 조건에서, 침수된 해수를 모두 배출하는 동안의 빌지주관에서의 평균유속을 검토하였다. 다만, 해당 선박의 화물창은 Fig. 1과 같이, 각 화물창별로 체적이 다르며, 각 화물창별 체적과 깊이는 Table 2와 같다.

해당 선박은 거주구역(Accommodation Space)와 연돌구역(Funnel Space)가 선수와 선미쪽에 별도로 설치되는 Two

Island 배치이며, 거주구역 전방에 No.1~No.3 화물창이 배치되고, No.4~No.9 화물창은 거주구역과 연돌구역 사이에 배치되며, 연돌구역 후방에 No.10 화물창이 배치된다.

Lee et al.(2021)이 제안한, 2 m/s 기준에서는 선박에서 침수된 물을 모두 배출하는데 가장 많은 시간이 소요될 것으로 예상되는 구역, 즉 침수된 해수를 모두 배출하는 동안의 평균유속이 가장 낮은 구역에서도 2 m/s 이상의 평균유속을 가져야 한다고 제안하고 있다.

Table 1. Specification of 24,000TEU class container ship and its bilge pumping system

Overall Length (m)	400
L×B×D (m)	384×61×33
Required internal diameter of main bilge pipe (mm)	344.2
Selected size of actual main and common bilge pipe	400A (9.5t, ID 387.4)
Selected size of actual branch bilge pipe for cargo holds	200A (8.2t, ID 202.1) or 150A (7.1t, ID 148.8)
Required capacity of bilge pump acc. to class rule (DNV or LR)	681.2 m <sup>3</sup> /h
Nominal capacity of actual bilge pump	200/710 m <sup>3</sup> /h × 110/40 m
Max. flow rate of actual bilge pump	1160 m <sup>3</sup> /h
Water speed at bilge main pipe with required capacity of pump	1.605 m/s
Water speed at bilge main pipe with actual nominal capacity of pump	1.673 m/s

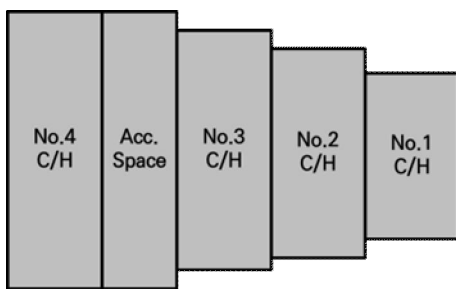


Fig. 1. Schematic arrangement of cargo holds.

Table 2. Specification of cargo holds

Cargo Hold	Net Volume (m <sup>3</sup> )	Depth (m)
No.1	41,526.4	31
No.2	47,151.0	31
No.3	51,099.2	31
No.4	52,365.5	31

따라서, 본 연구에서는 선박의 전방에 배치되는 No.1~No.4 화물창에 대해서 각각 평균유속을 계산하였다. 기관실 전방에 배치되는 No.5~No.9 화물창은 체적과 깊이가 No.4 화물창과 동일하므로, No.4 화물창 보다 평균유속이 빠를 것으로 예상되며, 기관실 후방에 배치되는 No.10 화물창은 기관실에 배치되는 빌지펌프와 그 거리가 매우 가까우므로, 계산을 생략하였다.

또한, 각 Cargo Hold의 내부는 선형으로 인해 높이에 횡단면 면적의 변화가 발생하게 되는데, 높이에 따른 횡단면 면적을 모두 고려하여 평가한다면, 좀더 정확한 계산이 가능하겠지만, 본 연구의 목적이 침수된 구역의 해수를 모두 배출하는 동안의 평균유속을 계산하는 것이기 때문에, 높이에 따른 횡단면의 변화는 의미가 없으며, 평균유속에는 Cargo Hold 내부의 체적과 높이만이 영향을 미치게 된다. 따라서, 본 연구에서는 각 Cargo Hold를 동일한 체적을 가지는 직육면체 형태로 치환하여 계산을 수행하였다.

Fig. 2는 No.1~No.4 Cargo Hold용 빌지시스템의 간략한 다이어그램을 나타낸 것이고, 각 Cargo Hold별 배관의 배치에 대한 상세는 Table 3, Table 4, Table 5 및 Table 6과 같다.

다만, Table 3, Table 4, Table 5 및 Table 6에 나타난 빌지시스템의 배치 및 사양은 실제 선박의 배관 배치와는 약간의 차이를 가진다. 좀 더 정확한 평가를 위해서 실제 선박의 배관의 배치를 상세하게 반영하는 것이 바람직하겠지만, 이는 실제 선박에서 배관의 배치를 조사 및 측정하여야 하는 문제점이 있고, 연구의 목적이 각 Cargo Hold에 대해서 침수된 해수를 모두 배출하는 동안의 평균속도를 비교하는 것이기 때문에, 기관실 내에서의 Elbow, Tee 등에 대한 상세한 배치는 생략하였다.

Table 3. Arrangement of bilge pumping system (No.1 Cargo Hold)

Node	Node	ND (Sch.40)	Length of Pipe (m)	Fittings and Valves
100	101	400A	1	Check Valve
101	102	400A	2	Butterfly Valve
102	110	400A	246.5	
110	111	200A	2	Butterfly Valve
111	112	200A	2	Check V/V, Elbow

또한, 빌지펌프의 설치위치는 일반적으로 기관실의 이중저탱크 상부에 설치되며, 빌지웰은 Cargo Hold의 이중저탱크 상부에 설치되는 점을 고려하여 빌지펌프, 빌지시스템의 배관 및 빌지웰은 높이 방향으로 변화가 없는 것으로 가정하였다.

Fig. 2에서 알 수 있듯이, 빌지시스템은 빌지주관과 공통빌

24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지 펌핑 성능에 대한 고찰

지관(Main Bilge Pipe and Common Bilge Pipe, Node 100~103) 및 빌지지관(Branch Bilge Pipe, Node 103~112, 103~122)로 구분할 수 있으며, No.2, No.3 및 No.4 Cargo Hold의 양현에 배치된 배관, 밸브 및 빌지웰의 위치는 대칭인 것으로 가정하였다.

Table 4. Arrangement of bilge pumping system (No.2 Cargo Hold)

Node	Node	ND (Sch.40)	Length of Pipe (m)	Fittings and Valves
100	101	400A	1	Check Valve
101	102	400A	2	Butterfly Valve
102	103	400A	218	
103	110	150A	10	Tee(branch)
110	111	150A	2	Butterfly Valve
111	112	150A	2	Check V/V, Elbow
103	120	150A	10	Tee(branch)
120	121	150A	2	Butterfly Valve
121	122	150A	2	Check V/V, Elbow

Table 5. Arrangement of bilge pumping system (No.3 Cargo Hold)

Node	Node	ND (Sch.40)	Length of Pipe (m)	Fittings and Valves
100	101	400A	1	Check Valve
101	102	400A	2	Butterfly Valve
102	103	400A	188	
103	110	150A	17.2	Tee(branch)
110	111	150A	2	Butterfly Valve
111	112	150A	2	Check V/V, Elbow
103	120	150A	17.2	Tee(branch)
120	121	150A	2	Butterfly Valve
121	122	150A	2	Check V/V, Elbow

Table 6. Arrangement of bilge pumping system (No.4 Cargo Hold)

Node	Node	ND (Sch.40)	Length of Pipe (m)	Fittings and Valves
100	101	400A	1	Check Valve
101	102	400A	2	Butterfly Valve
102	103	400A	141.5	
103	110	150A	19.7	Tee(branch)
110	111	150A	2	Butterfly Valve
111	112	150A	2	Check V/V, Elbow
103	120	150A	19.7	Tee(branch)
120	121	150A	2	Butterfly Valve
121	122	150A	2	Check V/V, Elbow

또한, 빌지시스템의 끝단에는 로즈박스가 설치되게 되며, 로즈박스가 어느 정도의 유동에너지를 나타내는지를 계산에 반영하여야 한다. 하지만, 로즈박스에서의 유동에너지 손실에 대한 자료가 없고, 로즈박스의 유통단면적이 빌지시스템용 배관 단면적의 2~3배 정도임을 고려하여, 본 연구에서는 로즈박스에 대한 유동에너지 손실을 고려하지 않았다.

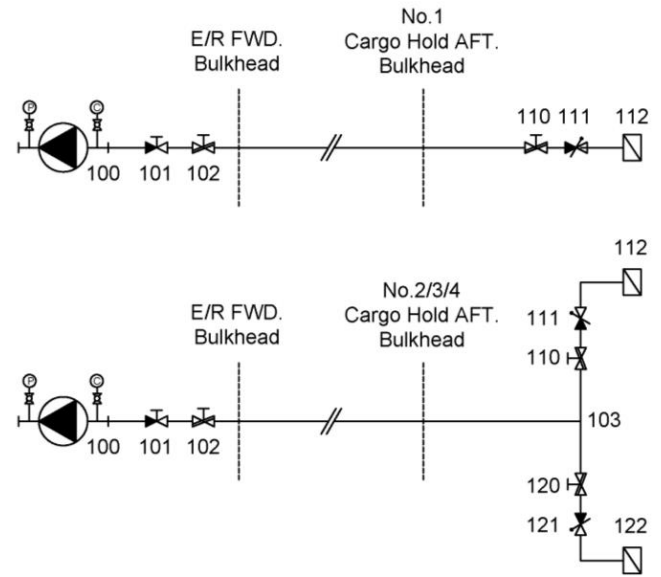


Fig. 2. Schematic diagram for bilge pumping system.

Fig. 3은 실제 선박에 설치되어 있는 빌지펌프의 성능곡선을 나타낸 것으로서, 빌지펌프의 성능시험기록을 기반으로 Curve-Fitting을 통해 함수를 추출하였다. 본 연구에서는 빌지펌프의 유량에 따른 흡입수두만이 필요하며, 빌지펌프의 유량에 따른 흡입수두는 식(1)과 같다.

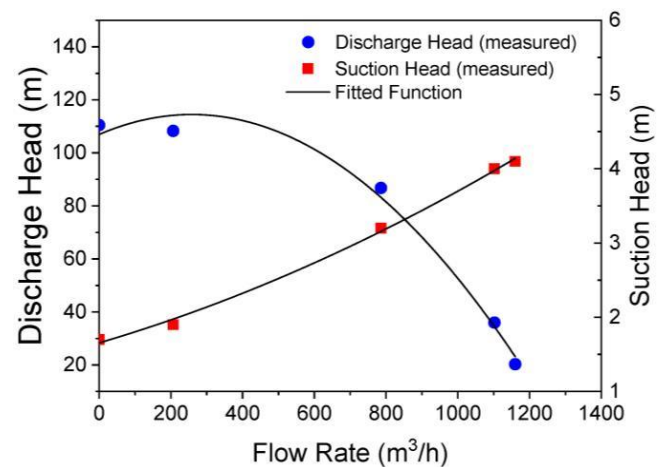


Fig. 3. Performance curve of bilge pump.

$$SH = 6.20183 \times 10^{-7} Q_b^2 + 0.00142 \times Q_b + 1.65441 \quad (1)$$

식(1)에서 SH는 흡입수두(m),  $Q_b$ 는 빌지펌프의 유량( $m^3/h$ )이다.

$$\Delta P = f \left( \frac{L + L_E}{D} \right) \frac{\rho V^2}{2} \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{2.5}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (3)$$

### 3. 유동에너지 손실

Fig. 4는 Bilge Pumping Performance의 평가의 개념을 나타낸 것이다. Fig. 4에서 알 수 있듯이, 빌지시스템은 빌지펌프의 흡입수두와 침수구역의 해수의 수위에 따른 정압수두의 합이 배관에서 발생하는 유동에너지 손실보다 커야, 빌지펌프가 침수구역의 해수를 흡입하여 선박외부로 배출할 수 있다(Lee et al., 2021).

유동에너지 손실은 배관에서 발생하는 마찰손실과 관부착품(밸브 등)에서 발생하는 부차 손실이 있다.

배관에서 발생하는 마찰손실에 대해서는 다양한 방법이 있지만, Darcy-Weisbach식이 가장 널리 사용되고 있다. Hazen-William식도 상당히 많이 사용되고 있지만, 적용가능한 레이놀즈수의 범위가 제한적이고 Darcy-Weisbach식에 비해 마찰손실을 과소평가하는 것으로 알려져 있다(Casey, 1992; Gilley et al., 1992; Diskin, 1960; IMO, p. Annex1-5, 2003).

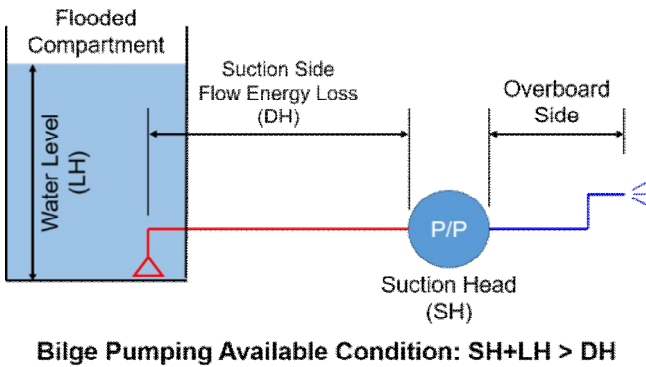


Fig. 4. Concept of bilge pumping performance.

따라서, 본 연구에서는 마찰손실 산정을 위해 Darcy-Weisbach식을 적용하였으며, 식(2)와 같다. 또한, Darcy-Weisbach식의 마찰손실계수는 Moody Chart를 적용하는 것이 가장 바람직하지만, 전산프로그램의 특성상 Moody Chart를 적용하기 어려우므로, Moody Chart를 가장 근사하게 구현한 것으로 알려져 있는 Colebrook-White식을 적용하였으며, 식(3)과 같다(Casey, 1992).

식(2)와 식(3)에서  $\Delta P$ 는 마찰손실(Pa),  $f$ 는 마찰손실계수,  $L$ 은 배관의 길이(m),  $L_E$ 는 관부착품의 등가길이(m),  $D$ 는 배관의 내경(m),  $\rho$ 는 유체의 밀도,  $V$ 는 유체의 속도(m/s),  $\epsilon$ 은 배관의 관벽거칠기(m),  $Re$ 는 레이놀즈수 이다.

식(2)와 식(3)에 따라 유동에너지 손실을 계산하기 위해서는 해수의 밀도와 점도가 필요하며, 다양한 조건이 있을 수 있지만, ITTC에서 제공하는 20°C의 표준해수의 물성치를 사용하였으며, 적용된 밀도와 점도는 각각  $1,024.8103 \text{ kg/m}^3$ 와  $0.001077 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  이다(ITTC, 2011).

또한, 배관에서 발생하는 마찰손실에서 많은 영향을 미치는 것이 배관의 관벽거칠기이며, 관벽거칠기에 대한 다양한 자료가 제시되어 있다(BSI, 2000, Annex C, Table C.1; Casey, 1992, Table 3.1; Fried and Idelchik, 1989, Table 2-1; Miller, 1990, Table 8.1; Stephenson, 1984, Table 1.2)

Table 7. Equivalent uniform roughness for pipes (BSI, 2000, Annex C, Table C.1)

Commercial pipe (new) material	Equivalent uniform roughness of the surface, mm
Glass, drawn brass, copper or lead	Smooth
Steel	0.05
Asphalted cast iron	0.12
Galvanized iron	0.15
Cast iron	0.25
Concrete	0.30 to 3.0
Riveted steel	1.0 to 10.0

Table 8. Roughness value, mm (Miller, 1990, p.190, Table 8.1)

2. Steel Pipes	New smooth pipes	0.025
	Centrifugally applied enamels	0.025
	Mortar lined, good finish	0.05
	Mortar lined, average finish	0.10
	Light rust	0.25
	Heavy brush asphalts, enamels and tars	0.5
	Heavy rust	1.0
	Water mains with general tuberculations	1.2

## 24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지 펌핑 성능에 대한 고찰

하지만, 빌지시스템용 배관과 같이 장기간 해수에 사용된 배관의 관벽거칠기에 대한 자료는 없는 것으로 파악되며, 기존의 자료들을 활용하여 빌지시스템용 배관의 관벽거칠기에 대한 기준을 설정하여야 한다. Lee et al.(2021)은 Table 8을 참고하여, 빌지시스템용 배관의 관벽거칠기를 1.0mm로 설정하였으며, 본 연구에서도 동일하게 1.0mm를 적용하였다.

관부착품 등에서 발생하는 부차손실을 평가하는 방법은 등가길이를 적용하는 방법과 손실계수를 적용하는 방법이 있다. 등가길이 방법은 관부착품에서 발생하는 유동에너지 손실과 동일한 유동에너지 손실이 발생하는 직선 배관의 길이로 환산하여 적용하는 방법이고, 손실계수는 관부착품 별로 마찰계수와 유사한 손실계수를 적용하는 방법이다. 등가길이와 손실계수 모두 국제적으로 공인되어 있는 표준이 없는 상황이지만, 산업계에서는 주로 등가길이를 사용하고 있는 상황이며, 등가길이에 대해서도 다양한 자료가 존재하지만, 본 연구에서는 일반적으로 많이 사용하고 있는 미국방화협회 기준인 NFPA Code 13에서 제시하고 있는 등가길이를 적용하였으며, Table 9와 같다. 다만, Table 9에서는 300A 배관까지만 등가길이를 제공하고 있는데, 본 연구에서 대상으로 하고 있는 24,000TEU급 컨테이너 선박의 빌지시스템은 400A 배관을 사용한다. 연구의 목적이 각 화물창 간의 평균 유속을 비교분석하는 것이기 때문에 각 화물창에 동일한 조건을 적용한다면 문제가 없다는 판단에 400A 배관용 관부착품에 대해서도 300A 배관용 관부착품과 동일한 등가길이를 적용하였다(NFPA, 2013).

### 4. 빌지펌핑성능 계산 절차

Fig. 4에서 알 수 있듯이, 빌지시스템의 펌핑 성능은 침수된 구획의 수위에 따라 변화하게 되므로, 비정상상태로 간주되어야 한다. 하지만, 시간의 변화에 따라 연속적으로 변화하는 비정상상태에서 빌지시스템의 펌핑 성능 즉 빌지주

관에서의 유속을 계산하는 것은 매우 어렵고 많은 노력이 필요한 사항이다.

따라서, 본 연구에서는 FDM(Finite Difference Method)를 적용하여 빌지시스템의 펌핑 성능을 계산하였다. 즉, 침수구획을 높이방향으로 일정한 간격을 가지는 구간으로 나누고, 각 구간별로 정상상태로 가정하여 해당 구간에서의 빌지주관에서의 유속을 계산하고, 각 구간들을 계산 결과를 합산하면 최종적으로 침수된 구획의 해수를 모두 배출하는 동안의 빌지주관에서의 평균유속을 계산할 수 있다.

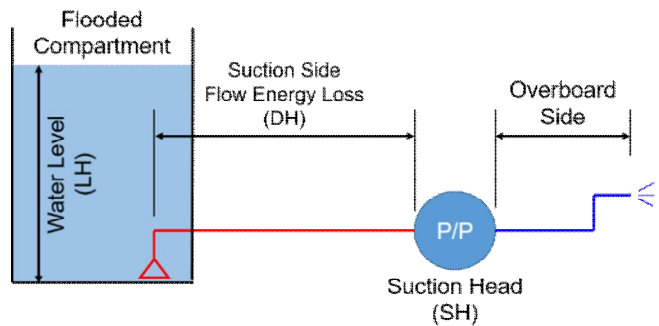


Fig. 5. Concept of the calculation.

다만, 침수된 구획을 높이방향으로 일정한 간격으로 구분할 때, FDM의 기본 개념에 적합하도록 가능한 한 간격이 작아야 한다. 하지만, 간격을 너무 작게 하면, 계산에 많은 시간이 소요될 뿐만 아니라 계산의 정확도에 미치는 영향이 그리 크지 않을 것으로 예상되기 때문에, 본 연구에서는 Cargo Hold의 높이 방향으로 Fig. 5에서와 같이 5mm의 간격으로 구간을 구분하였다. 5mm는 Cargo Hold의 높이 31m의 0.016%에 해당되는 값으로서, FDM을 적용하기에 충분한 값으로 판단하였다.

본 연구에서 사용한 계산절차는 아래 및 Fig. 6과 같으며, 계산 절차에서 수렴조건은 식(3)과 식(4)를 적용하였다.

Table 9. Equivalent schedule of the 40 steel pipe length chart (NFPA Code 13 2013ed, p.13-237, Table 23.4.3.1.1)

Fittings and Valves	Fittings and Valves Expressed in Equivalent Meter of Pipe														
	15mm	20mm	25mm	32mm	40mm	50mm	65mm	80mm	90mm	100mm	125mm	150mm	200mm	250mm	300mm
45° elbow	-	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	1.2	1.5	2.1	2.7	3.4	4.0
90° standard elbow	0.3	0.6	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	3.0	3.7	4.3	5.5	6.7	8.2
90° long-turn elbow	0.2	0.3	0.6	0.6	0.6	0.9	1.2	1.5	1.5	1.8	2.4	2.7	4.0	4.9	5.5
Tee or cross (flow turned 90°)	0.9	1.2	1.5	1.8	2.4	3.0	3.7	4.6	5.2	6.1	7.6	9.1	10.7	15.2	18.3
Butterfly valve	-	-	-	-	-	1.8	2.1	3.0		3.7	2.7	3.0	3.7	5.8	6.4
Gate valve	-	-	-	-	-	0.3	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8
Swing check	-	-	1.5	2.1	2.7	3.4	4.3	4.9	5.8	6.7	8.2	9.3	13.7	16.8	20.0

- (1) 빌지 주관에서서의 유량을 특정한 값으로 가정
- (2) 가정된 유량에 해당되는 펌프의 흡입수두(SH)를 계산
- (3) 가정된 유량을 이용하여 빌지시스템용 배관에서 발생하는 유동에너지손실(dH)을 계산
- (4) 침수구역의 수위(일정한 간격으로 나눈 구간)에 따른 수두(LH)를 계산
- (5) SH + LH - dH를 계산하여 수렴조건을 만족하면 (6)으로 이동하고, 수렴조건을 만족하지 못하면, 빌지주관에서서의 유량을 다시 가정하여 수렴조건을 만족할 때까지 (1)~(4)까지의 계산을 반복
- (6) 침수구획의 해당 구간에 대한 빌지펌프의 유량을 이용하여 빌지주관에서서의 유속을 계산하고, 다음 구간으로 이동하여 모든 구간에 대해 계산이 완료될 때까지 (1)~(6)을 반복한다.

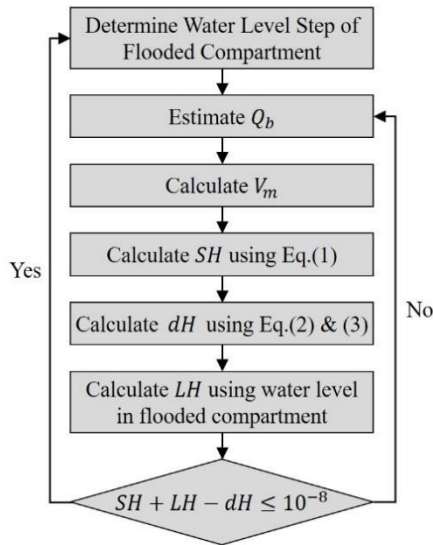


Fig. 6. Calculation procedure.

$$\left| \frac{SH + LH - dH}{dH} \right| < 10^{-8} \quad (3)$$

$$|dH_{i-1} - dH_i| < 10^{-8} \quad (4)$$

식(4)는 빌지펌프가 최대 유량(1160 m<sup>3</sup>/h)으로 운전되는 조건에서, 침수구획의 수위에 따른 수두(LH)와 펌프의 흡입수두(SH)의 합이 배관에서 발생하는 유동에너지손실(dH)보다 클 경우에는 식(3)의 수렴조건으로 수렴할 수가 없기 때문에, 식(4)에서처럼 배관에서 발생하는 유동에너지손실(dH)가 더 이상 변화하지 않으면 계산을 종료하기 위해, 식(4)를 수렴조건으로 사용하였다.

## 5. 빌지펌핑성능 계산 결과 및 고찰

Table 3, Table 4, Table 5 및 Table 6에 나타난 빌지시스템용 배관의 배치를 이용하여 1번 화물창부터 4번 화물창까지에 대해 빌지펌핑성능을 계산하였다. 빌지펌핑성능은 해당 화물창이 침수되어 해수가 화물창에 가득 채워져 있다고 가정된 상태에서 계산하였으며, 그 결과는 Table 10, Table 11, Table 12 및 Table 13과 같다.

Table 10. Calculation results for No.1 Cargo Hold (Actual Arrangement, 400A-200A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	321.63	0.758	2.18	2.18	0.00
10%	519.74	1.225	2.56	5.66	3.10
20%	657.88	1.550	2.86	9.06	6.20
30%	770.57	1.816	3.12	12.42	9.30
40%	868.18	2.046	3.35	15.75	12.40
50%	955.51	2.252	3.58	19.08	15.50
60%	1035.26	2.440	3.79	22.39	18.60
70%	1109.11	2.614	3.99	25.69	21.70
80%	1160.00	2.734	4.14	28.10	24.80
90%	1160.00	2.734	4.14	28.10	27.90
100%	1160.00	2.734	4.14	28.10	31.00
Mean Velocity (m/s)			2.121		

Table 11. Calculation results for No.2 Cargo Hold (Actual Arrangement, 400A-150A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	258.98	0.610	2.06	2.06	0.00
10%	422.31	0.995	2.36	5.46	3.10
20%	536.10	1.263	2.59	8.79	6.20
30%	628.92	1.482	2.79	12.09	9.30
40%	709.30	1.672	2.97	15.37	12.40
50%	781.22	1.841	3.14	18.64	15.50
60%	846.89	1.996	3.30	21.90	18.60
70%	907.70	2.139	3.45	25.15	21.70
80%	964.59	2.273	3.60	28.40	24.80
90%	1018.24	2.400	3.74	31.64	27.90
100%	1069.15	2.520	3.88	34.88	31.00
Mean Velocity (m/s)			1.766		

24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지 펌핑 성능에 대한 고찰

Table 10, Table 11, Table 12 및 Table 14에서 알 수 있듯이, 화물창이 침수되어 완전히 해수로 채워져 있다고 가정한 상태에서 화물창 내의 해수를 모두 배출하는 동안의 빌지주관에서의 평균유속은 1번 화물창이 가장 높고, 4번 화물창이 가장 낮은 것으로 나타났다.

4번 화물창이 빌지펌프가 설치되어 있는 기관실과 가장 가깝기 때문에, 평균속도가 다른 화물창 보다 높게 나타날 것으로 예상하였으나, 계산결과는 반대의 결과를 나타내었다.

Table 12. Calculation results for No.3 Cargo Hold (Actual Arrangement, 400A-150A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	240.97	0.568	2.03	2.03	0.00
10%	393.98	0.928	2.31	5.41	3.10
20%	500.56	1.180	2.52	8.72	6.20
30%	587.49	1.384	2.70	12.00	9.30
40%	662.77	1.562	2.87	15.27	12.40
50%	730.13	1.721	3.02	18.52	15.50
60%	791.63	1.866	3.17	21.77	18.60
70%	848.58	2.000	3.31	25.01	21.70
80%	901.86	2.125	3.44	28.24	24.80
90%	952.10	2.244	3.57	31.47	27.90
100%	999.77	2.356	3.69	34.69	31.00
Mean Velocity (m/s)			1.650		

Table 13. Calculation results for No.4 Cargo Hold (Actual Arrangement, 400A-150A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	237.95	0.561	2.03	2.03	0.00
10%	389.18	0.917	2.30	5.40	3.10
20%	494.52	1.165	2.51	8.71	6.20
30%	580.43	1.368	2.69	11.99	9.30
40%	654.84	1.543	2.85	15.25	12.40
50%	721.41	1.700	3.00	18.50	15.50
60%	782.19	1.843	3.14	21.74	18.60
70%	838.48	1.976	3.28	24.98	21.70
80%	891.14	2.100	3.41	28.21	24.80
90%	940.80	2.217	3.54	31.44	27.90
100%	987.91	2.328	3.66	34.66	31.00
Mean Velocity (m/s)			1.630		

또한, 1번 화물창은 기관실로부터 가장 멀기 때문에 평균 속도가 가장 낮을 것으로 예상하였지만, 1번 화물창 또한 반대의 결과가 나타나, 다른 화물창에 비해 평균속도가 가장 높았으며, 2m/s 기준에도 적합한 유일한 화물창으로 나타났다.

일반적인 예상과 다른 결과를 나타낸 이유는, 4번 화물창이 다른 화물창에 비해 체적이 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창에서 빌지웰간의 거리가 각각 28 m, 42.4 m, 47.4 m로서 4번 화물창에서의 빌지웰간의 거리가 가장 멀어서, 해당되는 배관 길이 만큼의 유동에너지 손실이 커지기 때문인 것으로 판단된다. Table 12와 Table 13에서 유동에너지손실은 4번 화물창용 빌지시스템에서 더 작게 발생하는 것을 나타내지만, 해당되는 유동손실에서의 유량은 4번 화물창이 더 작다. 동일한 배관이라면 유량이 낮아질 때 유동에너지손실이 작아져야 하는데, 4번 화물창용 빌지시스템에서 발생하는 유동에너지손실과 유사하게 나타나는 것은, 4번 화물창의 빌지주관(Fig. 2에서 Node 103~112 및 103~122구간)의 길이가 3번 화물창의 빌지주관 길이보다 더 길기 때문이다. Table 5와 Table 6을 비교하여 보면, 3번 화물창은 빌지주관의 길이가 21.2m이고, 4번 화물창은 23.7m이기 때문이다.

또한, 화물창의 체적 및 빌지주관의 길이 이외에도 공통 빌지주관의 길이 또한 유동에너지손실에 많은 영향을 미치기 때문에, 유량, 각 배관의 길이 등을 최적으로 배치하여야 한다는 것을 확인할 수 있다.

다만, 1번 화물창은 다른 화물창과 달리 빌지웰이 화물창의 중앙에 1개만이 존재하기 때문에, 유량의 50%만을 적용하는 다른 화물창의 빌지주관과 다르게, 유량의 100%를 빌지주관(Fig. 2에서 Node 110~112 구간)에 적용하기 때문에 유동에너지손실이 더 커질 것으로 예상되지만, 1번 화물창은 다른 화물창과 다르게 빌지주관이 200A이고, 화물창의 체적이 상대적으로 작기 때문에 평균유속이 높게 나타난 것으로 판단된다.

Table 10, Table 11, Table 12 및 Table 14에서 알 수 있듯이, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창은 2m/s 기준을 만족시키지 못하며, 결과적으로 본 연구에서 대상으로 하는 24,000TEU급 컨테이너 선박은 SOLAS Reg.II-1/35-1 규칙의 도입취지에 적합하지 않은 선박이 된다.

24,000TEU급 컨테이너 선박을 SOLAS Reg.II-1/35-1 규칙의 도입취지에 적합하도록 하기 위해서는 빌지시스템용 배관의 크기를 변경하는 등의 조취를 취해야 하는데, 본 연구에서는 각 화물창의 빌지주관을 150A에서 200A 증가시켜 계산을 수행하였으며, 그 결과는 각각 Table 14, Table 15 및 Table 16과 같다.



Table 14, Table 15 및 Table 16에서와 같이, 빌지지관을 150A에서 200A로 변경하게 되면, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창 모두가 2 m/s 기준을 만족시킨다는 것을 확인할 수 있다.

Table 14. Calculation results for No.2 Cargo Hold (Modified Arrangement, 400A-200A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	458.69	1.081	2.44	2.44	0.00
10%	728.33	1.716	3.02	6.12	3.10
20%	916.69	2.160	3.48	9.68	6.20
30%	1070.43	2.523	3.89	13.19	9.30
40%	1160.00	2.734	4.14	15.48	12.40
50%	1160.00	2.734	4.14	15.48	15.50
60%	1160.00	2.734	4.14	15.48	18.60
70%	1160.00	2.734	4.14	15.48	21.70
80%	1160.00	2.734	4.14	15.48	24.80
90%	1160.00	2.734	4.14	15.48	27.90
100%	1160.00	2.734	4.14	15.48	31.00
Mean Velocity(m/s)			2.479		

Table 15. Calculation results for No.3 Cargo Hold (Modified Arrangement, 400A-200A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	446.23	1.052	2.41	2.41	0.00
10%	709.61	1.672	2.97	6.07	3.10
20%	893.57	2.106	3.42	9.62	6.20
30%	1043.72	2.460	3.81	13.11	9.30
40%	1160.00	2.734	4.14	16.19	12.40
50%	1160.00	2.734	4.14	16.19	15.50
60%	1160.00	2.734	4.14	16.19	18.60
70%	1160.00	2.734	4.14	16.19	21.70
80%	1160.00	2.734	4.14	16.19	24.80
90%	1160.00	2.734	4.14	16.19	27.90
100%	1160.00	2.734	4.14	16.19	31.00
Mean Velocity (m/s)			2.459		

Table 16. Calculation results for No.4 Cargo Hold (Modified Arrangement, 400A-200A)

Tank Level	Flow Rate (m <sup>3</sup> /h)	Water Vel. at Bilge Main (m/s)	Pump Suc. Head (SH,m)	Flow Energy Loss (dH,m)	Static head by Water Level (LH, m)
0%	457.29	1.078	2.43	2.43	0.00
10%	726.10	1.711	3.01	6.11	3.10
20%	913.88	2.154	3.47	9.67	6.20
30%	1067.15	2.515	3.88	13.18	9.30
40%	1160.00	2.734	4.14	15.56	12.40
50%	1160.00	2.734	4.14	15.56	15.50
60%	1160.00	2.734	4.14	15.56	18.60
70%	1160.00	2.734	4.14	15.56	21.70
80%	1160.00	2.734	4.14	15.56	24.80
90%	1160.00	2.734	4.14	15.56	27.90
100%	1160.00	2.734	4.14	15.56	31.00
Mean Velocity (m/s)			2.476		

다만, 동일한 유량의 조건에서 2번 화물창의 유동에너지 손실이 3번 화물창과 4번 화물창에서 발생하는 유동에너지 손실보다 낮게 나타나는 점이 특이한 점이다. 동일한 유량과 동일한 배관이라면, 배관의 길이가 길수록 유동에너지 손실이 증가하게 되는데, 공통빌지관의 길이가 더 긴 2번 화물창에서 유동에너지 손실이 더 적게 나타나는 것은 2번 화물창의 빌지지관의 길이가 짧기 때문이다.

Table 4에서와 같이, 2번 화물창의 빌지지관 길이는 14 m 이므로, 각각 3번 화물창과 4번 화물창용 빌지지관의 길이인 21.2m와 23.7 m에 상당히 짧고, 빌지지관의 크기가 200A이기 때문이다. 400A의 배관의 내부단면적은 0.1179 m<sup>2</sup>이고 200A 배관의 내부단면적은 0.0321 m<sup>2</sup>이어서 400A 배관의 단면적은 200A 배관 단 면적의 약 3.7배이며, 빌지지관인 200A 배관이 공통빌지관인 400A 배관에 비해 50%의 유량이 흐른다고 하더라도 더 많은 유동에너지손실이 발생할 수 있다.

400A 배관에 1160 m<sup>3</sup>/h의 유량이 흐르고, 200A 배관에 580 m<sup>3</sup>/h의 유량이 흐른다고 가정했을 때, 400A 배관과 200A 배관에서 발생하는 유동에너지손실은 배관 1m당 각각 0.0242m와 0.1995 m이며, 200A 배관이 유량이 50%로 줄어들었음에도 유동에너지손실이 약 8.3배 정도 발생한다. 따라서, 빌지지관의 길이가 상대적으로 짧은 2번 화물창의 유동에너지 손실이 작은 것으로 나타나게 된다.

또한, 3번 화물창은 빌지지관의 길이가 4번 화물창 보다 짧지만, 그 차이가 크지않고, 3번 화물창이 4번 화물창보다 훨씬 긴 공통빌지관을 가지기 때문에 동일한 유량임에도 불구하고 유동에너지손실이 크게 나타나는 것이다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 현재까지 건조된 선박들 중에서 그 길이가 가장 긴 것으로 알려져 있는 24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지펌핑성능에 대해 고찰하였으며, 그 결론은 아래와 같다.

- (1) 24,000TEU급 컨테이너선박의 빌지시스템은 선급의 규칙에 맞게 설계되었지만, 선급 규칙의 논리적 오류로 인해, 설치되어 있는 빌지펌프의 정격유량 및 최대유량 조건에서도 SOLAS Reg.II-1/35-1의 2 m/s 요건을 만족시키지 못하였다.
- (2) 24,000TEU급 컨테이너선박에 설치되어 있는 빌지시스템(펌프 및 배관)을 이용하여, 1번 화물창, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창에 대해, 각 화물창이 침수되어 해수로 가득차 있다고 가정된 상태에서 해수를 모두 배출하는 동안에 빌지주관에서의 평균유속을 계산하였으며, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창은 평균유속이 2 m/s 미만인 것을 나타냈으며, Lee et al. (2021)이 제안한 2 m/s 기준에 적합하지 않은 것으로 나타났다
- (3) 24,000TEU급 컨테이너선박에 설치되어 있는 빌지시스템이 2 m/s 기준에 적합하도록 하기 위해, 2번 화물창, 3번 화물창 및 4번 화물창의 150A의 빌지주관을 200A 배관으로 교체하여 계산한 결과, 화물창 내의 해수를 모두 배출하는 동안의 빌지주관에서의 평균유속이 2 m/s 보다 높아 2 m/s 기준을 만족시키는 것으로 확인되었다.

## References

- [1] BSI(British Standards Institution)(2000), BS EN ISO 9906:2000, Rotodynamic pumps - Hydraulic performance acceptance tests-Grades 1 and 2, ISO, ISBN: 0580344215.
- [2] Casey, T. J.(1992), Water and Wastewater Engineering Hydraulics, Oxford (UK): Oxford University Press., ISBN: 0198563590.
- [3] Pérez, D. M., L. C. Ramos-Arzola, and A. Q. Torres(2020), Pressure-Dependent Models in Ship Piping Systems, Journal of Marine Science and Application, Vol. 19, pp. 266-274.
- [4] Fried, E. and I. E. Idelchik(1989), Flow Resistance: a design guide for engineers, Taylor & Francis, ISBN: 0891164359.
- [5] IMO(International Maritime Organization)(2003), Interpretations of MSC/Circ.913 - Hydraulic calculation standard, FP 48/5/2, IMO.
- [6] ITTC(International Towing Tank Conference)(2011), Fresh water and sea water properties (Rev. 2), <https://www.ittc.info/media/7989/75-02-01-03.pdf> (Accessed 21<sup>st</sup> Sep. 2022).
- [7] Gilley, J. E., E. R. Kottwitz, and G. A. Wieman(1992), Darcy-Weisbach Roughness coefficient for Gravel and Cobble Surfaces, Journal of Irrigation and Drainage Engineering, Vol. 118, pp. 104-112.
- [8] Lee, K. W., G. Y. Han, and M. E. Kim(2021), Proposed Design Criteria for a Bilge Pumping System for Large Container Ship, International Journal of Maritime Engineering, Vol. 163, Part A2, p. A-71-A-79.
- [9] Pawara, M. U., W. Setiawan, R. J. Ikhwan, Alamsyah, A. I. Wulandari, Suardi, A. M. Nugraha A, T. Hidayat, M. I. Ansori, and F. Mahmuddin(2021), Bilge System Design on 500 GT Ferry for Bulukumba - Selayar Route, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 921.
- [10] Diskin, M. H.(1960), The Limits of Applicability of the Hazen-Williams Formula, La Houille Blanche, Vol. 46, pp. 720-726.
- [11] Miller, D. S.(1990), Internal Flow Systems: Design and Performance Prediction, Gulf Publishing Company, ISBN: 0872010201.
- [12] NFPA(2013), NFPA 13 Standard for the Installation of Sprinkler Systems 2013 Edition, NFPA, ISBN: 978-145590554-4 (Redline PDF).
- [13] Stephenson, D.(1984), Pipeflow Analysis, Elsevier, ISBN: 0444422838.
- [14] Tan, Wei Chian, I-Ming Chen, Dimitrios Pantazis, and Sinno Jialin Pan(2018), Transfer Learning with PipNet: For Automated Visual Analysis of Piping Design, 2018 IEEE 14th International Conference on Automation Science and Engineering, pp. 1296-1301.
- [15] Jiang, Wen-Ying, Yan Lin, Ming Chen, and Yan-Yun Yu(2015), A co-evolutionary improved multi-ant colony optimization for ship multiple and branch pipe route design, Ocean Engineering, Vol. 102, pp. 63-70.
- [16] Bian, Xuanyi, Yan Lin, and Zongran Dong(2022), Auto-routing Methods for Complex Ship Pipe Route Design, Journal of Ship Production and Design, pp. 1-15.

Received : 2022. 09. 29.

Revised : 2022. 10. 17.

Accepted : 2022. 10. 28.