

# 밸러스트 탱크의 급수/배수 시간 예측에 관한 연구

김 환 익<sup>\*1</sup>, 김 문 언<sup>\*2</sup>, 최 도 형<sup>\*2</sup>

## A Study on the Loading/Unloading Time Prediction of the Ballast Tank

H. I. Kim, M. U. Kim, and D. H. Choi

The ballast tank of a ship is a system that realizes the required shipping condition and controls the draft of a ship. The loading/unloading of the ballast tank is frequently operated during navigation and the accurate prediction of the loading/unloading time is very important. A numerical algorithm that predicts the loading/unloading time of the ballast tank has been developed and applied to the prediction of the loading/unloading time of the ballast tank with various piping systems. This algorithm can be useful in optimizing the ballast tank system in early design stage.

**Key Words:** 필요흡입수두(required Net Positive Suction Head), 전양정(total head), 유효흡입수두(available Net Positive Suction Head), 흘수(draft), 배관(piping)

### 1. 서 론

선박의 밸러스트 탱크는 선박 운항 시 화물 적재 상태 등에 따라 운항 가능 조건(즉 프로펠러가 충분히 물에 잠긴다든지 적당한 선수/선미 trim 조건, heeling 조건 등을 맞춤)을 구현하기 위한 시스템이다. 또한 선박이 항구에 도착하거나 해협을 지나는 경우 수심의 제한으로 인하여 선박의 흘수(draft)를 제한하는 경우가 있는데 이럴 때도 밸러스트 탱크를 사용하여 선박의 흘수를 조정하게 된다. 이처럼 밸러스트 탱크의 경우 급수/배수를 자주 하게 되는데 이때 소요되는 시간을 정확히 추정하거나 혹은 규정에 정해진 시간 내에 (de)ballasting이 이루어져야 한다.

본 연구에서는 밸러스트 탱크의 급수/배수 시간을 예측할 수 있는 알고리즘을 개발하고, 이 알고리즘을 바탕으로 수치 계산을 수행하여 밸러스트 탱크의 설계에 적용하고자 한다.

### 2. 해석 방법

#### 2.1 배수

초기에 자연 배수가 행해진다. 자연 배수는 해수면으로의 토출 유량이 펌프의 정격용량의 일정 수준(일반적으로, 110%) 이상일 때까지 실시하고, 그 이후에는 펌프 배수를 실시한다.

#### 2.1.1 자연 배수

자연 배수의 배관 시스템은 아래 Fig. 1에 나타내었다.

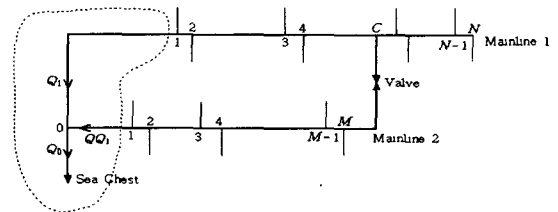


Fig. 1 Piping system for the gravity unloading

선박의 흘수와 밸러스트 탱크의 수위 차만큼 증력에 의하여 배수가 실시되며, 펌프를 사용하는 경우에 비해 유량이 크개는 2배까지 많아진다.

\*1 학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

\*2 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

2.1.2 펌프 배수

펌프를 사용하여 배수할 때의 배관 시스템은 Fig. 2에 나타내었다.

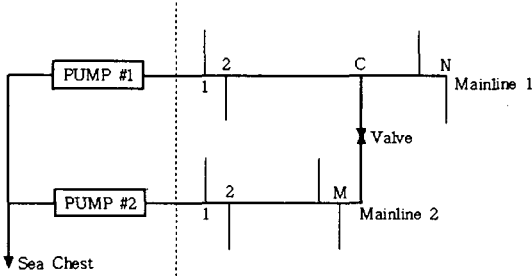


Fig. 2 Piping system for the pump unloading

펌프 배수는 다음의 2조건을 만족하도록 결정된다.

$$NPSH_{av} \geq NPSH_{req} \tag{1}$$

$$Q \leq Q_{max} \tag{2}$$

만약 유효흡입수두  $NPSH_{av}$ 와 필요흡입수두  $NPSH_{req}$ 가  $Q_{max}$ (펌프의 최대 용량) 이상의 유량  $Q$ 에 대해서도 식 (1)을 만족한다고 하면 펌프로부터의 배수 유량은

$$Q = Q_{max} \tag{3}$$

에 의해 결정되고 식 (1)을 만족하는 유량  $Q$ 가 식 (2)도 만족한다고 하면 배수 유량은

$$NPSH_{av} = NPSH_{req} \tag{4}$$

에 의해 결정된다.

2.2 급수

급수는 펌프를 작동시켜 행해진다. 밸러스트 탱크의 급수 배관 시스템은 Fig. 3에 나타내었다.

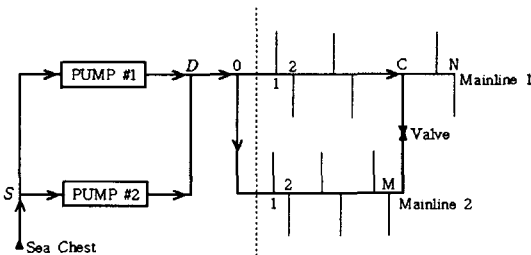


Fig. 3 Piping system for the pump loading

펌프 1과 2의 성능이 동일할 때는 등가인 펌프 하나로 대체할 수 있고 이 때의 배관 시스템은 Fig. 4에 나타내었다.

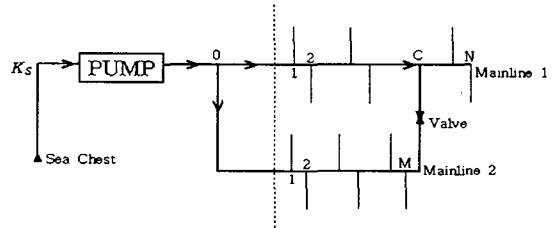


Fig. 4 Equivalent piping system for the pump loading

펌프에 의한 급수 시 밸러스트 탱크의 수위가 비교적 낮을 경우(임계수위 이하)에는 펌프로부터의 토출량  $Q_P$ 는

$$NPSH_{av} = NPSH_{req} \tag{5}$$

에 의해 결정되고 비교적 높을 때에는 전양정  $H_T$ 에 의해 결정된다.

$$H_T = a_1 - B_1 Q_P^2 \tag{6}$$

여기서  $a_1$ ,  $B_1$ 은 등가 펌프의 양정-유량 곡선 ( $H-Q$  Curve)을 결정하는 상수이다. 또 각각의 펌프는 최대 용량  $Q_{max}$  이하에서 운전되어야 하므로 등가 펌프에 대해서는

$$Q_P \leq 2Q_{max} \tag{7}$$

를 만족해야 한다.

2.3 밸러스트 탱크의 수위 계산

밸러스트 탱크의 초기 수위를 경계 조건으로 하여 각 탱크로부터의 유량이 계산되면 계산된 유량을 사용하여 탱크의 수위를 다시 계산한다. 탱크의 수위 계산은 다음의 미분 방정식을 이용한다.

$$-A_n(h_n) \frac{dh_n}{dt} = q_n, \quad n = 1, \dots, N \tag{8}$$

여기서  $N$ 은 탱크의 개수이며,  $h_n$ 은 탱크의 수위,  $t$ 는 시간,  $A_n(h_n)$ 은 탱크의 수위가  $h_n$ 일 때의 탱크의 단면적,  $q_n$ 은 탱크로부터 유출되는 유량을 말한다.

식 (8)을 차별화하면

$$-A_n \frac{h_n(t+\Delta t) - h_n(t)}{\Delta t} = q_n \quad (9)$$

이므로  $t=t+\Delta t$  때의 탱크의 수위  $h_n(t+\Delta t)$ 를

$$h_n(t+\Delta t) = h_n(t) - \frac{q_n}{A_n} \Delta t \quad (10)$$

으로 근사적으로 얻는다. 여기서 새롭게 얻어진 탱크의 수위를 경계 조건으로 하여 시간을 한 간격 진행한 후 유량을 계산하고 이러한 과정을 급수/배수가 종료될 때까지 반복한다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 밸러스트 탱크의 형상 및 배치

밸러스트 탱크는 L Type을 사용하였으며 탱크의 형상은 Fig. 5에 나타내었다.

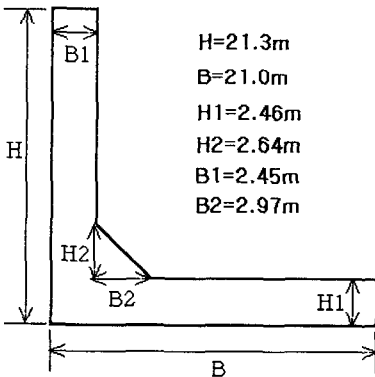


Fig. 5 Dimension of the ballast tank

탱크의 개수는 좌현(Port)에 6개, 우현(Starboard)에 6개로 하며, 탱크의 배치는 Fig. 6에 나타내었다.

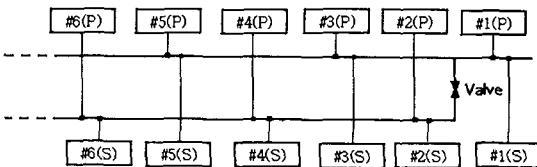


Fig. 6 Configuration of the ballast tank

탱크의 부피는 1번 탱크(P&S)부터 6번 탱크(P&S)까지 순차적으로 각각 3200, 2847, 2916, 2916, 2874, 3605  $m^3$ 이다.

#### 3.2 펌프의 특성 및 흡수

1200 rpm으로 운전되는 밸러스트 펌프의 최대 용량은 2000  $m^3/hr$ , 정격 용량은 1500  $m^3/hr$ 이며, 성능 특성은 다음과 같이 주어진다.

$$NPSH_{req} = 0.87 + 1.13 \times 10^{-6} Q^2 \quad [m]$$

$$H-Q \text{ Curve} : H = 34.2 - 4.2 \times 10^{-6} Q^2 \quad [m]$$

흡수는 최저 2.7 m, 최고 12 m이며 우회관로의 밸브가 열려 있는 경우는 Ring-main Type, 닫혀 있는 경우는 Standard Type이라고 명명한다.

#### 3.3 계산 결과 - 급수/배수 시간

급수/배수는 전체 탱크에 대하여 동시에 실시되며, Standard Type일 경우 밸러스트 탱크의 급수/배수 시간은 Table 1로 주어진다.

Table 1 Standard Type

	Ballast Tank	배수/급수시간( hr )	
		배수(Unloading)	급수>Loading)
Main line 1	#5(P)	8.466	9.506
	#5(S)	8.591	9.518
	#3(P)	9.602	9.627
	#3(S)	9.648	9.633
	#1(P)	9.942	9.675
	#1(S)	9.937	9.674
Main line 2	#6(P)	8.212	9.249
	#6(S)	8.350	9.265
	#4(P)	9.427	9.391
	#4(S)	9.470	9.396
	#2(P)	9.691	9.421
	#2(S)	9.686	9.420
	Total	9.942	9.675

Ring-main Type일 경우 밸러스트 탱크의 급수/배수 시간은 Table 2로 주어진다.

Table 2 Ring-main Type

	Ballast Tank	배수/급수시간( hr )	
		배수(Unloading)	급수>Loading)
Main line 1	#5(P)	8.541	9.506
	#5(S)	8.663	9.518
	#3(P)	9.600	9.600
	#3(S)	9.634	9.603
	#1(P)	9.845	9.621
	#1(S)	9.841	9.621
Main line 2	#6(P)	8.145	9.362
	#6(S)	8.282	9.362
	#4(P)	9.372	9.553
	#4(S)	9.419	9.560
	#2(P)	9.703	9.606
	#2(S)	9.702	9.606
	Total	9.845	9.621

Table 1과 2의 결과를 살펴보면, 배수 시간이 급수 시간보다 0.3시간 정도 느리고 우회관로의 밸브가 열려 있으면 0.1시간 정도 급수/배수 시간을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 또한, 급수/배수의 종료는 펌프에서 가까운 탱크부터 이루어지며, 급수의 경우 각각의 탱크의 급수가 거의 비슷한 시간에 이루어짐을 알 수 있다.

### 3.4 계산 결과 - 전체 유량

전체 배수 시 해수면으로 토출되는 유량은 Fig. 7에 나타내었다.

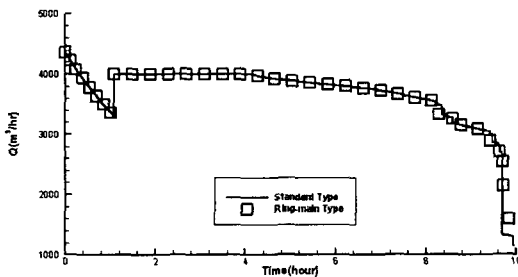


Fig. 7 Total flow rate in the unloading

약 1.1시간까지 자연 배수가 이루어지며, 이 시간 이후로는 필요흡입수두에 의한 펌프 배수가 이루어짐을 알 수 있다. 펌프 배수 시 초기에는 펌프의 최대 용량만큼의 유량을 토출하다 점차 줄어들어서 배수를 종료함을 알 수 있다.

전체 급수 시 해수면에서 흡입되는 유량은 Fig. 8에 나타내었다.

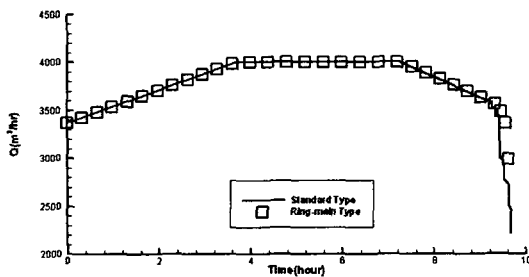


Fig. 8 Total flow rate in the loading

급수는 초기에 필요흡입수두에 의해 흡입되는 유량이 증가하다 약 4시간을 전후하여 전양정에 의해

유량이 펌프 최대 용량만큼 흡입되다 점차 줄어들어서 급수를 종료함을 알 수 있다. 그리고 우회관로의 밸브 상태에 상관없이 급수/배수 시 시간에 따른 전체 유량이 거의 비슷하게 나타남을 알 수 있다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 6쌍의 밸러스트 탱크를 가진 시스템에 대해서 급수/배수 시간을 추정해 보았다. 개발된 알고리즘은 임의의 탱크의 개수를 갖는 시스템에 적용할 수 있을 뿐만 아니라 시간 간격을  $10^{-3}hr$  정도로 하여도 매우 빠른 시간에 급수/배수 시간을 예측할 수 있다. 그리고 우회관로를 적절한 위치에 설치하면 급수/배수 시간을 줄일 수 있으며, 일반적으로 배수가 급수보다 더 오래 걸리므로 밸러스트 탱크의 설계 시 배수 시간을 기준으로 설계를 하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

## 후기

본 연구는 삼성중공업의 "Ballast Tank의 Loading/Unloading 시간 예측 Program 개발" 연구 과제의 연구비에 의하여 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] JSDS-10(일본조선의장설계기준) Ballast 관장치 설계기준, (1981).
- [2] 박한영, 김경업, 펌프핸드북, 동명사, (2002).
- [3] 정희택, 정양범, 조재우, 배진수, "선박용 배관 시스템의 수력학적 설계 및 해석 프로그램 개발", 한국동력기계공학회지, pp.57-63, (2001).