

# 벌크 화물선용 자동 밸러스트수 교환계획 시스템 개발

홍충유\* · 박제웅\*

\*조선대학교 첨단해상운송시스템설계 및 생산관리학과

## Optimized Ballast Water Exchange Management for Bulk Carriers

CHUNG-YOU HONG\* AND JE-WOONG PARK\*

\*Department of Advanced Marine Transportation Plan and Production Management, Chosun University, Gwangju, Korea

**KEYWORDS :** Ballast Water Management 밸러스트수 관리, IMO A.868(20) 국제해사기구 밸러스트수 관리규정, Sequential Exchange 순차적 교환, Heuristic Algorithm 휴리스틱 알고리즘, Optimization 최적화

**ABSTRACT :** Many port states, such as New Zealand, U.S.A., Australia, and Canada, have strict regulations to prevent arriving ships from discharging polluted ballast water that contains harmful aquatic organisms and pathogens. They are notified that transfer of polluted ballast water can cause serious injury to public health and damage to property and environment. For this reason, ballast exchange in deep sea is perceived as the most effective method of emptying ballast water. The ballast management plan contains the effective exchange method, ballast system, and safety considerations. In this study, we pursued both nautical engineering analysis and optimization of the algorithm, in order to generate the sequence of stability and rapidity. A heuristic algorithm was chosen on the basis of optimality and applicability to a sequential exchange problem. We have built an optimized algorithm for the automatic exchange of ballast water, by redefining core elements of the A\* algorithm, such as node, operator, and evaluation function. The final version of the optimized algorithm has been applied to existing bulk carrier, and the performance of the algorithm has been successfully verified.

### 1. 서 론

지난 수천 년 동안 선박의 균형과 안정성을 위한 밸러스트 도구로 바위나 모래, 철 등을 사용하였다. 하지만, 이러한 고체 밸러스트 성분의 불편한 적하역 특징 때문에 현대에는 뛰어난 적하역 효율성을 지닌 해수를 선박의 밸러스트 도구로 사용하고 있다.

현대의 선박은 세계적으로 전체 물류수송의 80%를 담당하고 있고, 이러한 선박들에 사용되는 밸러스트수는 한 해 약 100억 톤에 달한다.

이러한 엄청난 양의 해수 이동과 더불어 해수 내의 해양 미생물(무척추 동물, 알, 유충, 낭포 등) 또한 해수와 더불어 이동하게 된다. 해양 미생물의 이동으로 해당 해양생태계가 파괴될 뿐 아니라 각종 병원체도 함께 전이된다.

이와 같이 밸러스트수로 인한 해양 미생물의 이동을 막기 위해 1993년/1997년 IMO 총회에서 Resolution A.774(18) / A.868(20)이 채택되었고, 2004년 2월 국제 외교회의를 통해, 밸러스트수의 처리에 관한 협약이 체결되었다. 해당 협약은 해양 무역 관련 각국의 기준을 얻어 2009년부터 발효된다.

협약이 발효되면 밸러스트수를 적재하는 대부분의 선박은

신조선/현존선에 관계없이 필수적으로 밸러스트수를 관리할 방안을 마련해야 한다. 해당 방안들은 IMO A.868(20)에서 제시된 바 있으며, Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다.

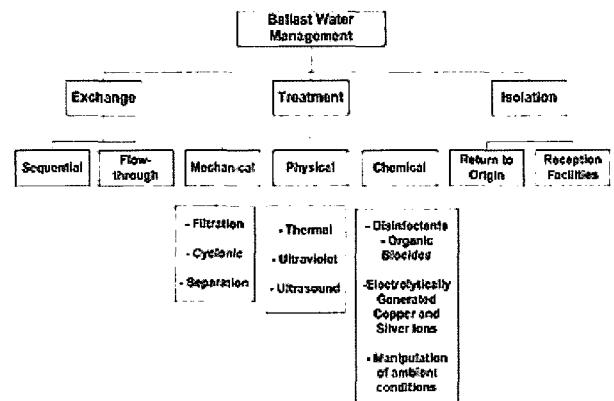


Fig. 1 Ballast Water Management Methods

밸러스트수 관리방안은 크게 교환(Exchange), 처리(Treatment), 고립(Isolation)의 3가지 방법으로 나누어지며, 이중 추가적인 장치의 설치 없이 선박의 밸러스트 시스템만으로 구현 가능한 방법은 교환방법이다.

따라서 본 논문에서는 이러한 교환방식에 초점을 맞추어, 이를 최적화하기 위해 먼저 벌크 화물선의 특징을 분석한 후, 벨

제1저자 홍충유 연락처: 서울특별시 구로구 구로동 235

02-2108-7373 mecasoft@nuri.net

리스트수 교환과정 중 안전성을 보장하기 위해 고려해야 할 점을 살펴보았다(홍충유, 2003). 또한 최적우선탐색을 본 문제에 효과적으로 적용하기 위해 다차원 상태공간 위에서 휴리스틱 알고리즘을 최적화하기 위한 방법을 연구하였다. 특히 밸리스트수 교환과정 동안의 신속성과 안전성에 주안점을 두어 최적의 시퀀스를 생성할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 개발된 프로그램을 실선에 적용하여 그 성능을 검증하였다.

## 2. 개발 내용

### 2.1 기반 기술

벌크 화물선의 기본적 특징과 밸리스트 시스템을 분석하고, 밸리스트수의 교환방법에 대해 파악하여, 적합한 안전성 검증 인자를 선정한다. 선정된 검증인자를 모두 만족시켜 줄 최적의 시퀀스를 인공지능적으로 찾기 위해 최적화 알고리즘 중 하나인 최적우선탐색을 살펴본다.

#### 2.1.1 벌크 화물선의 특징

##### ① 벌크 화물선의 특징

2차 대전 이후 곡물의 해상수송에 적합한 전용선으로 개발되었으며, 일반적으로 재화계수(stowage factor)  $40\text{ft}^3/\text{LT}$  이하의 곡물, 석탄 등을 비포장으로 운송하고, 중/대형의 경우 재화계수가 적은( $15\sim 20\text{ft}^3/\text{LT}$ ) 철광석 등을 수송한다.

벌크 화물선의 안정적인 운항을 위해서는 기본적으로 종강도(longitudinal strength)와 복원성(intact stability), 시계성(visibility) 등이 만족되어야 하며, 추가로 적합한 프로펠러의 침수도(propeller immersion) 및 적정 트림(trim) 확보, 슬래밍방지(bottom slamming) 등도 이루어져야 한다.

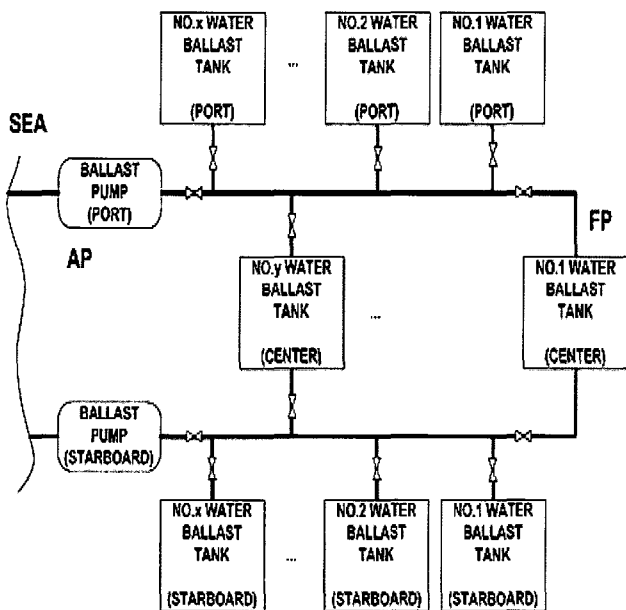


Fig. 2 Ballast system of typical bulk carriers

##### ② 벌크 화물선의 밸리스트 시스템

벌크 화물선의 밸리스트 시스템은 Fig. 2와 같은 구조를 지닌다.

밸리스트 시스템은 크게 밸리스트 펌프, 밸리스트 파이프, 밸리스트 밸브, 밸리스트 탱크의 4 가지 구성요소로 이루어져 있다.

밸리스트 펌프에는 좌현펌프와 우현펌프가 있으며, 좌현펌프에만 연결된 탱크는 좌현 탱크(P)들이며, 우현펌프(S)에만 연결된 탱크는 우현의 탱크들이고, 좌현펌프와 우현펌프에 모두 연결된 밸리스트 탱크는 중앙탱크(C)로 분류된다. 각각의 탱크는 밸리스트 파이프를 통해 펌프와 연결되며, 각 밸리스트 밸브를 열고 닫음으로써 원하는 탱크에 밸리스트수를 입수/배수 할 수 있다.

다른 선종과는 다르게 벌크 화물선에는 추가적으로 특정 화물창을 밸리스트 홀드(ballast hold)로 쓸 수 있도록 설계되어 있다. 악천후 등의 영향으로 충분한 홀수를 확보하기 위해 화물창에 밸리스트수를 채운다. 이러한 화물창은 밸리스트 펌프와의 연결구조상 중앙탱크(C)에 속한다.

#### 2.1.2 밸리스트수의 교환방법

밸리스트수의 교환방법은 순차적 교환(sequential exchange)와 넘침 교환(flowthrough exchange)으로 나뉜다.

순차적 교환은 공해 상에서 선박의 입항 200해리 전, 밸리스트수를 순차적인 스텝에 따라 모두 교환하는 것이다. 순차적 교환의 고려요소는 시간적 요소와 안전성 요소이다. 시간적 요소는, 밸리스트수 교체가 선박의 입항 전 200해리 이전에 완료되어야 하는 특성으로 인하여 최단시간 내에 밸리스트수 교체를 완료할 수 있도록 고려해야 함을 의미한다. 안전성 요소란, 밸리스트수 교체가 선박의 운항 중 이루어지기 때문에 수 교체 작업 도중 선박의 안전성 및 항해 안정성이 유지되어야 함을 의미한다.

넘침 교환은 순차적 교환과 혼용되어 사용되거나 독자적으로 사용된다. 밸리스트수에 3배수를 주입하여 넘치게 하여 95% 이상 해수를 교환하는 방식이다.

넘침 교환은 특별히 최적화를 필요로 하지 않기 때문에 본 연구에서는 순차적 교환방법을 다루며, 이러한 순차적 교환의 시간적 요소와 안전성 요소를 모두 고려하여 최적의 교환 시퀀스를 생성하는 것이 본 연구의 목적이다.

#### 2.1.3 순차적 교환의 검증인자(criteria)

순차적 교환 계획의 시퀀스에서 개개의 스텝은 고유의 적재 조건(lading condition)을 이룬다. 시퀀스를 진행하는 동안 이전 스텝에서 다음 스텝으로의 진행이 빈번히 발생하므로, 그에 따라 적재조건이 계속 변하게 된다. 연속적인 적재조건의 변화는, 선박의 무게 및 부력 분포 등에 큰 영향을 주어 선박의 안전성에 위해를 가할 수 있다.

따라서 각 스텝의 안전성을 검사할 필요가 있으며, 이를 위한 안전성 판단기준을 검증인자라 한다. 검증인자는 IMO A.868(20)의 기준을 따라 Table 1과 같이 선정되었다.

Table 1 Criteria of ballast water exchange

Criterion	Definition	Rule
Longitudinal Strength	Check whether ship's longitudinal bending moment and shear force are bounded in allowable limit.	(IACS UR S17)
Intact Stability	Check ship's righting force in case of rolling motion.	(IMO Res.A.167)
Slamming	Check whether forward draft is greater than allowable limit in order to prevent ship's forward bottom from slamming.	(MARPOL Annex I Reg.13)
Propeller Immersion	Check whether propeller is fully immersed.	(IACS UR S1A)
Trim	Check whether ship's trim is bounded in allowable limit.	(MARPOL Annex I Reg.13)
Heeling	Check whether ship's heeling is bounded in allowable limit.	(MARPOL Annex I Reg.13)
Visibility	Check whether visibility of bridge is larger than allowable limit.	(SOLAS Ch5.Reg.22)

Fig. 3은 정상 발라스트 상태에서 수동(manual)으로 만들어진 시퀀스에 의해 순차적 교환작업이 진행되었을 경우, 각 검증인들이 Table 1의 요구치를 위반할 수 있는 위험성 정도를 레이더 차트로 나타낸 것이다.

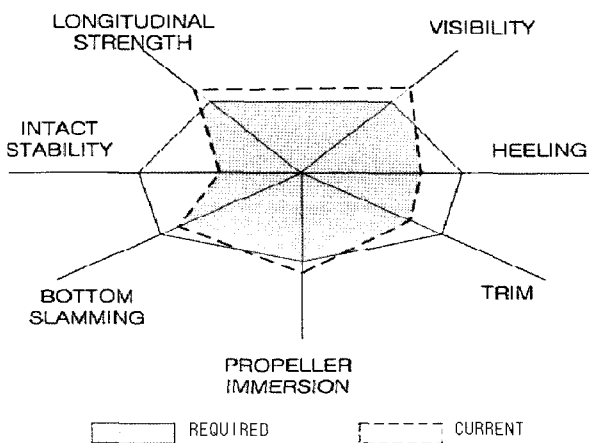


Fig. 3 Required limit and current value of each criterion

2.1.4 최적화 알고리즘

알고리즘이란, 문제를 풀기 위한 절차나 방법을 말한다. 본 연구에서 주어진 문제는 최적화(시간, 안전성/항해 안정성)된 시퀀스를 생성하는 것이고, 따라서 문제를 풀기 위한 최적화

알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 주로 그래프 탐색 중 무정보 탐색(uninformed search) 및 휴리스틱 알고리즘(heuristic algorithm)을 검토하였고, 그 중 본 개발에 적합하다고 판단된 알고리즘인 최적우선 탐색에 대해 파악하였다.

\* 최적우선탐색(Best First Search)

최적우선탐색은 그래프 탐색의 일종으로, 노드, 연산자, 평가함수를 지닌다. 노드는 탐색이 목표에 도달하기 위해 거쳐 가는 결정점으로, 시작노드에서 종료노드까지의 최적의 시퀀스를 찾는 것이 알고리즘의 목적이다. 연산자는 노드에서 노드로의 이동을 정의한 것이다. 평가함수는 노드를 평가하여, 탐색의 우선순위를 정하기 위한 것이다. 최적우선탐색의 위와 같은 세 가지 요소들을 본 문제에 맞게 수정하여 최적의 밸러스트수 순차적 교환계획을 생성하는 시뮬레이션 프로그램에 반영하게 된다.

2.2 개발 이론

순차적 교환 시퀀스 생성을 위해 고려해야 할 요소를 분석하여, 이를 알고리즘에 적용하여 가장 최적인 시퀀스를 찾을 수 있도록 하였다.

2.2.1 순차적 교환 계획을 위한 고려요소

순차적 교환 시퀀스의 효과적인 스텝을 생성하기 위하여 시간적 요소와 안전성 요소를 알고리즘에 적용하였다. 시간적 요소는 평가함수에 적용이 되었고, 안정성 요소는 연산자에 적용되었다.

① 시간적 요소

시퀀스의 진행시간이 최소가 되도록 해야 한다. 시퀀스의 진행시간은 선박 내 밸러스트 펌프의 최대 구동 여부에 달려 있으며, 각각의 스텝이 되도록 좌현/우현의 두 펌프를 모두 작동하도록 전체 시퀀스를 구성해야 한다. 따라서 각 스텝에서의 입수/배수 탱크의 선정 및 조합은 본 개발에 있어서 매우 중요하며, 따라서 알고리즘에 반영되었다.

② 안전성 요소

시퀀스가 진행될 동안 모든 스텝에서 Table 1의 검증인들이 지켜지도록 해야 하며, 선박의 안전성 확보를 위해 이 요소 또한 알고리즘에 반영되었다.

2.2.2 본 연구에 적용된 Heuristic Algorithm

최적우선탐색의 노드(node), 연산자(operator), 평가함수(evaluation function)를 다음과 같이 설계하였다.

① 노드

노드는 스텝과 동일개념이며, 선박 내 모든 발라스트 탱크 내의 수량 정보를 포함해야 한다. 특히 스텝의 입수/배수상태를 구분해야 하므로, 배수상태에 (-)의 부호를 사용한다. (밸러스트 탱크의 총 개수는 k 개다.)

$$n = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_k) \tag{1}$$

위와 같은 노드 정의에 의해서 노드는 k-차원 상태공간 (statespace) 상의 한 점으로 표시될 수 있으며, 시퀀스는 k-차원 상태공간상의 시작노드에서 종료노드까지의 직선들의 집합으로 표현될 수 있다(최재홍, 1992). Fig. 4 는 k=2 일 때의 예시이다.

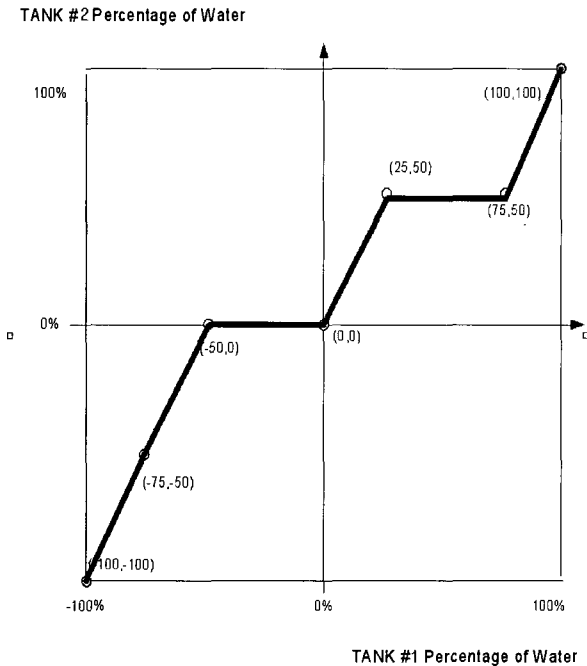


Fig. 4 Statespace and sequence

② 연산자

연산자는 이전 스텝으로부터 다음 스텝을 생성하는 규칙이다. 연산자는 k-차원 상태공간상에서 부모 노드에서 자식 노드를 확장(expand)하는 규칙을 의미한다.

펌프를 최대 구동하기 위하여, 하나의 스텝은 밸러스트 탱크를 최대 2개까지 선택할 수 있다. 이러한 탱크 선택의 조합의 수와 그에 따른 입수/배수 시간에 따라 연산자에 의해 확장되는 자식 노드의 수가 정해진다.

확장된 자식 노드들을 적하역 지침기에 입력하여 노드 중 검증인자를 모두 만족시키지 못하는 노드는 삭제한다. 이러한 과정을 통해 시퀀스에서 불안정한 스텝이 생성되는 것을 방지할 수 있다. 적하역 지침기는 Loading condition을 입력받아 선박의 배수량, 홀수, 중강도, 복원성 등을 계산하는 프로그램으로 본 연구에서는 노드의 Loading condition을 입력받아 해당 노드가 검증인자의 만족하여 안전한 지를 판별하여 준다.

③ 평가함수

평가함수는 노드에 평가값(여기서는 입수/배수에 걸리는 시간)을 매겨, 알고리즘이 탐색에 그 값을 반영하도록 한다. 알고리즘은 평가값이 낮은 노드를 우선적으로 탐색하게 된다. 최적 우선탐색의 가장 일반적인 평가함수인 목표 노드까지의 거리

를 이용하여(최재홍, 1992), f 함수는 현재 노드 n 에서 종료 노드까지의 예상 지출 값을 의미하며 식(2)와 같이 설정한다.

$$f(n) = \frac{1}{p} \sum_{i=1}^k t_n(i) \tag{2}$$

f(n) 은 현재 노드의 모든 밸러스트 탱크를 각각 연결된 펌프에 의해 배수할 때 걸리는 시간의 총합을 펌프의 개수 p 로 나눈 것이다. (밸러스트 탱크는 총 k 개다) f(n) 값은 노드 n 에서 종료 노드까지 진행되는 총 시간보다 절대 클 수 없으며, 종료 노드에 가까워질수록 작은 값을 갖는다. 따라서 알고리즘이 목표 노드까지 진행하도록 할 수 있다.

④ 알고리즘의 전체흐름도

①~③과 같이 노드, 연산자, 평가함수를 정의하여, 알고리즘은 최종적으로 Fig. 5 와 같은 흐름도를 따른다. 최적우선탐색 알고리즘은 A\* 알고리즘과 평가함수를 제외한 부분에서 동일하며, A\* 알고리즘의 흐름을 그대로 가진다(이성찬, 1998).

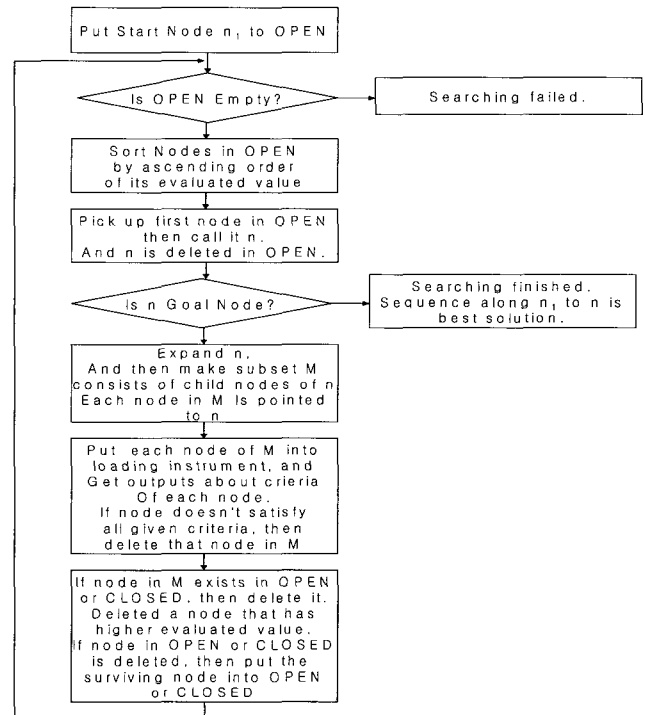


Fig. 5 Flowchart of algorithm

2.2.3 실제 벌크 화물선에 알고리즘 적용

실제 벌크 화물선의 Normal ballast condition 에 대하여 본 알고리즘을 적용하였다.

해당 실선의 기본 제원과 밸러스트 시스템의 개략적인 상황, 적용된 검증인자의 한계값을 Table 2 에 나타내었다. Table 3 은 결과적으로 구해진 시퀀스를 나타낸 것이며, Fig. 6 은 각 스텝에서의 검증인자 관련 값을 나타낸다.

Table 2 Ship's properties and criteria limitation

Ship Principal Particular Data			
Ship Type : Bulk Carrier			
LOA (m)	289		
LBP (m)	279		
Breadth (m)	45		
Depth (m)	24.2		
KeelDepth (m)	0.023		
Pump Number	2		
Pump(Port) Capa (CuM/ h)	1600		
Pump(Stbd) Capa (CuM/ h)	1600		
Water Ballast Tank Capacity			
Tank Name	Volume (CuM)	Port	Stbd
F.P.TK	3327.5	o	o
NO.1 W.B.TK_C	4292.9	o	o
NO.2 W.B.TK_P	5768.7	o	x
NO.2 W.B.TK_S	5768.7	x	o
NO.3 W.B.TK_P	5966.7	o	x
NO.3 W.B.TK_S	5966.7	x	o
NO.4 W.B.TK_P	5917.1	o	x
NO.4 W.B.TK_S	5917.1	x	o
NO.5 W.B.TK_P	4942.1	o	x
NO.5 W.B.TK_S	4942.1	x	o
A.P.TK	1170.1	o	o
NO.6 HOLD	22479.8	o	o
Criteria : Allowable Value			
Max SF (%)	100		
Max BM (%)	100		
Min GoM (m)	0.15		
Max Trim (m)	4.2		
Max Heel (deg)	3		
Min FP.Draft	4.5		
Min Propeller Immersion (%)	100		
Max BlindLength (m)	450		

Table 3 Sequence of normal ballast condition

STEP	1	2	3	4	5	6	7
F.P.TK	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
NO.1 W.B.TK_C	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
NO.2 W.B.TK_P	-100	-100	-100	0	100	100	100
NO.2 W.B.TK_S	-100	-100	-100	-100	-100	0	100
NO.3 W.B.TK_P	-100	-80	-80	-80	-80	-80	-80
NO.3 W.B.TK_S	-100	-100	-100	-100	-100	-100	-100
NO.4 W.B.TK_P	-100	-100	-100	-100	-100	0	100
NO.4 W.B.TK_S	-100	-100	-100	0	100	100	100
NO.5 W.B.TK_P	-80	-80	-60	-60	-60	-60	-60
NO.5 W.B.TK_S	-80	-80	-80	-80	-80	-80	-80
A.P.TK	-100	0	100	100	100	100	100
Draft at AP (m)	9.79	9.127	9.393	8.819	9.393	8.819	9.393
Draft at FP (m)	6.251	6.404	6.211	4.672	6.211	4.672	6.211
Trim (m)	-3.53	-2.72	-3.18	-4.14	-3.18	-4.14	-3.18
List (deg)	0.096	1.191	2.186	2.015	2.186	2.307	2.186
GoM (m)	12.81	13.46	13.53	16.16	13.53	16.16	13.53
Prop.Immers.(%)	112.5	104.6	107.8	100.6	107.8	100.6	107.8
Critical SF %	73.46	64.3	75.19	78.38	75.19	78.38	75.19
Critical BM %	66.69	57.57	67.36	76.71	67.36	76.71	67.36
Visibility (m)	256.6	246.7	253.5	283.1	253.5	283.1	253.5
Time	0:00:00	0:43:52	0:43:52	3:36:19	3:36:19	3:36:19	3:36:19

	8	9	10	11	12	13	14	15
-100	-100	-100	-100	-100	0	100	100	
0	100	100	100	100	100	100	100	
100	100	100	100	100	100	100	100	
100	100	100	100	100	100	100	100	
-80	-80	0	20	100	100	100	100	
-100	-100	-20	0	80	80	80	100	
100	100	100	100	100	100	100	100	
100	100	100	100	100	100	100	100	
-60	-60	-60	-60	-60	0	80	80	
0	80	80	80	80	80	80	80	
100	100	100	100	100	100	100	100	
8.939	9.393	8.952	8.952	9.393	9.27	9.737	9.79	
5.167	6.211	4.932	4.932	6.211	5.228	6.091	6.251	
-3.77	-3.18	-4.02	-4.02	-3.18	-4.04	-3.64	-3.53	
-1.02	2.186	1.889	0.303	0.014	2.25	-1	0.096	
15.24	13.53	15.08	15.08	13.53	14.55	13.17	12.81	
102.1	107.8	102.2	102.2	107.8	106.1	111.9	112.5	
77.63	75.19	77.72	77.72	75.19	76.27	73.79	73.46	
66.44	67.36	91.59	91.59	67.36	66	67.31	66.69	
272.6	253.5	278.3	278.3	253.5	274.8	259.7	256.6	
2:28:15	2:28:15	2:59:00	0:44:45	2:59:00	1:51:11	2:04:46	0:44:45	

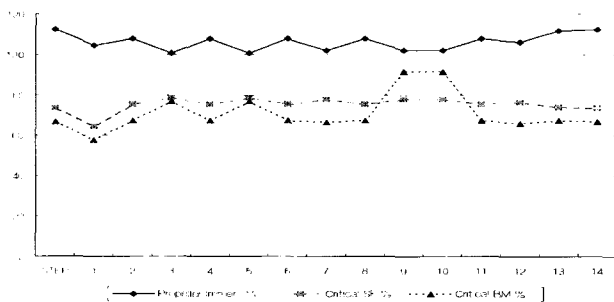


Fig. 6 Criteria information of sequence

### 3. 결 론

본 연구에서는 벌크 화물선을 대상으로 한 벨러스트수 순차적 교환 시퀀스의 최적 생성에 관한 내용을 다루었으며 이를 요약하면 다음과 같다.

첫째로 벌크 화물선의 특징을 분석하고, 순차적 교환을 파악하여, 벌크 화물선에 적합한 검증인자를 선정하였다.

둘째로 선정된 검증인자를 만족시키면서 가장 경제적인 순차적 교환 시퀀스를 구하기 위하여, 최적우선탐색의 세 가지 핵심 요소인 노드, 연산자, 평가함수를 재정의 하였다.

셋째로 본 연구를 통해 완성된 알고리즘의 실제 벌크 화물선에 적용한 결과 모든 검증인자를 만족시키고, 빠른 시퀀스를 생성해 낼 수 있었다.

본 연구의 결과물을 바탕으로, 컨테이너선과 같은 타 선종의 순차적 교환 시퀀스 생성에도 적용될 수 있는 이론적 기반이 확보되었다. 또한 선박 적재화물의 적하역 시의 최적 적하역 Process 개발 등에도 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

이성찬 (1998). A Study on the Computer Aided Process Planning System for Turning Using Heuristic Search Algorithm, 박사학위논문, 한국과학기술원, pp 39-47.

최재홍 (1992). A Heuristic Graph Search Based Collision Free Path Planning Strategy for Robot Manipulators, 석사학위논문, 한양대학교, pp 5-12.

홍충유 (2003). "Optimized Ballast Water Exchange Management for Tanker", 한국해양공학회 춘계학술대회논문집, pp 1-4.

IMO (1997). Resolution A.868(20)

---

2004년 5월 10일 원고 접수

2004년 6월 21일 최종 수정본 채택