

海上 交通量の 效率的 管理 方案에 관하여(II)

— 일반 수로의 경우 —

尹 明 五* · 李 哲 榮**

A Study on Optimum Control of Marine Traffic(II)

— In the Domain of Passage —

Myung-Ou Yun · Cheul-yeong Lee

〈目 次〉

Abstract

1. 序 論

2. 交通量の 適正 配分

2.1 기본 개념의 정리

2.2 正式化

2.3 適用 例

3. 通航 順序列의 構成

3.1 문제의 性質 및 定式化

3.2 平均 待期시간의 最小化

3.3 D.P.에 의한 알고리즘

3.4 適用例

4. 結 論

Abstract

As increasing needs of marine transportation, world merchant fleet and ship's size were enlarged and it caused frequent disasters in human lives and natural environment. By the reason of the above, they started to establish the Vessel Traffic System(VTS) at the European coast in 1960' and most of advanced contries established and managed it to prevent the sea traffic accidents in these days.

The concept of traffic control at sea can be divided into three types. First, the initial gathering of informations about ship's identity and movement etc.. Second, monitoring the traffic flow and amendment of instructions.

Third, organization and direction of ships by allocating routes and speeds.

* 正會員, 木浦海洋專門大學

** 正會員, 韓國海洋大學

Where the goal of traffic control is safety of traffics and developing effectiveness of navigation channel, if traffic volume is less than channel capacity then the above first or second level of control would be sufficient but if it is bigger than that, more positive policy of control should be adopted as same as third type of the above.

In this paper where the strategy of VTS is focused on the control of traffic density to be spread equally, as possible, all over the navigation channels and also improvement of effectiveness, it suggests algorithm to assign the vessels to the channels with balanced traffic density, and other algorithms using D.P. to sequence the vessels assigned to one channel in optimum order which decreases the mean waiting time in sense of channel effectiveness, with numerical examples.

I. 序 論

현대에 들어 海上 物動量의 증가에 따른 船腹量의 확대와 船型의 대형화로 水路의 交通 密度가 증대하게 되었으며 이에 따라 海難 事故의 위험이 증가하게 되고 또한 해난 사고의 발생시 인명 및 자연 환경에 미치는 피해가 심각한 문제로 대두되었다. 특히 지형적, 사회적 여건에 따라 특정 해역에 通航 交通量이 집중되어 交通量의 폭주가 발생하는 경우 海上交通의 안전 확보와 水路의 효율적인 이용에 대한 대책마련에 관심이 모아지게 되었으며 그 결과 1960년대에 구미해역을 중심으로 하여 시작된 船舶 交通 管理시스템(vessel traffic system, VTS)은 현재 水路의 지형적 조건과 기상 등에 의한 航海環境 및 선박 通航量의 밀집 등으로 海上 交通 事故의 위험이 높은 선진국의 연안 해역에서 널리 채용되어 운영되기에 이르렀으며 海上 交通量을 안전하게 관리하기 위한 국제간의 협력도 원활히 이루어 지고 있다.¹⁾

현재 운영되고 있는 海上 交通量 관리의 형태는 크게 나누어 첫째, 선박의 특성과 위치 이동에 관한 정보를 수집하는 수준의 형태 둘째, 陸上의 레이더에 의해 管理 對象 海域의 海上 交通流를 감시하는 수준의 형태, 셋째, 선박 개개의 이동을 監視, 統制하여 水路의 進入 및 이동 속도를 관리하는 수준의 형태 등으로 분류 해 볼 수 있다.²⁾

海上 交通量 관리의 목적을 海上 交通의 안전 확보와 水路 이용의 효율성 제고에 둔다고 할 때 이루어 지게 되는 海上 交通量 관리의 형태를 통

航 交通量과 水路의 용량과의 관계에서 살펴보면 水路를 이용하는 通航 交通量이 그 水路의 자연적 허용 교통용량의 범위 내에 있다면 교통 관리의 형태는 전술한 첫째 및 둘째의 수준으로도 그 목적을 원만히 달성할 수 있으나 通航 交通量이 水路의 허용 교통용량을 넘어서면 셋째의 경우와 같이 보다 적극적인 교통관리를 통하여 水路通航의 안전확보와 水路이용의 효율성을 높여야 할 것이다.

水路의 용량과 통항 交通量의 척도는 앞서 발표된 논문과³⁾ 같이 안전 계수(safety factor)를 도입하여 計量化하는 방법과 선박의 크기 및 속도 등 物理的 特性을 기반으로 할 수 있다. 본 연구에서는 물리적 특성을 기반으로한 교통량 관리 문제를 다루고자 하며 이 때 管理 政策을 정하는 觀點은 다음과 같이 생각해 볼 수 있다.

첫째, 수로를 중요한 制限 要素로 하여 水路内の 交通量 密度가 가급적 균등하도록 配分하는 경우, 또는 對象 交通量이 수로통항을 완료하는 시간이 비슷하도록 대상 교통량을 각 수로에 대해 適定 配分하는 경우

둘째, 수로를 중요한 제한 요소로 보지 않고 단지 선박들을 수로에 진입시키기 위한 通航 順序를 배치하는 경우

따라서 본 논문에서는 交通量을 관리하는 문제를 對象 交通量에 대해 통항 가능한 수로가 복수 개로 주어진 경우 대상 교통량을 이용 가능한 수로의 범위에서 分散 配置하여 전체 수로에 있어서의 교통량 밀도가 가급적 균등하게 함으로써 수로의 안전성을 높이고자 하는 配分의 문제와

각 수로에 대해 그 수로의 利用度가 최대화 될 수 있도록 수로 통항을 적극적으로 관리하는 정책을 취하였을 때 수로를 이용하는 대상 선박들이 수로 진입을 완료할 때 까지의 平均 待期 시간이 최소화 되게 通航 順序列을 구성 함으로써 수로 이용의 효율성을 제고하는 配置의 문제로 二元化 하여 그 해결을 위한 알고리즘을 개발, 제시하고자 한다.

2. 交通量の 適正 配分

2.1 기본 개념의 정리

對象 交通量を 水路에 적정 배분하는 문제는 교통관리의 목적을 어디에 두느냐에 따라 방법이 달라질 수 밖에 없다. 따라서 교통관리의 목적을 관리 對象 海域 내의 각 水路에 交通量 密度가 균등하여 특정 水路에 交通量이 폭주함이 없이 원활하고 안전하게 通航이 이루어지도록 하는 방향의 관리와 조석, 조류, 기상 등과 같은 자연적 제한 또는 戰時下의 통제 등과같은 인위적 제한에 의해 선박의 通航時間이 제한 되는 경우 對象 交通量이 전체 水路에서 通航이 완료되는 시간이 비슷해 지도록 각 水路에 對象 交通量을 배분하는 경우로 나누어 문제를 정리하기로 한다.

2.1.1 水路 交通量 密度의 均等化

해상에서의 交通量 密度는 일반적으로 단위 면적당의 선박 척수라고 하며 이것은 임의 시간에서의 密度가 되므로 靜的 交通量 密度라 할 수 있다. 그러나 실제 문제에 있어서 水路는 일정 면적을 갖고 있으므로 水路 내에 존재하는 선박의 크기도 密度에 고려되어야 할 것이며 선박이 진행중인 상태에서는 선박의 속도도 고려하지 않으면 안된다. 따라서 임의 시간에서의 선박의 水路 점유 수준을 靜的 交通量 密度라 할때 여기에 부가하여 길이를 중심으로한 선박의 크기와 선속을 함께 고려한 密度를 動的 概念의 交通量 密度라 한다면 실제 선박이 航進하고 있는 상태에서의 動的 概念의 交通量 密度는 다음과 같이 정의될 수 있다.

P_{ij} 를 선박 i 가 水路 j 에 미치는 動的 概念의 交

通量 密度에 대한 기여도라 한다면

$$P_{ij} = (L_{ij}/V_{ij})/C_j \dots\dots\dots (2.1)$$

가 되며 여기에서

- C_j ; 水路 j 의 길이
- L_{ij} ; j 水路에 배정된 i 선박의 길이
- V_{ij} ; j 水路에 배정된 i 선박의 속도
- L_{ij}/V_{ij} ; 速長比, 特性時間

을 나타낸다.

속장비는 특성시간이라고도 하며 선박의 길이 만큼 진행하는데 소요되는 시간을 의미한다. 이것은 이동물체의 조종성능을 평가하는 지표로도 사용되며 이 특성 시간이 길수록 조종이 곤란함을 의미하고 선박의 경우 통상적인 항해 속력에서 100톤급의 선박은 약6초, 10만톤 급의 선박의 경우 약36초 정도의 값을 갖는다.⁵⁾

動的 概念의 交通量 密度에 대한 기여도 P_{ij} 는 一方向의 單線 通航流에서 선박의 길이가 클수록 커지고 속도 및 水路의 길이가 길수록 작아짐을 알 수 있다.

2.1.2 水路 이용시간의 均等化

교통 관리의 정책을 對象 交通量이 水路 통과를 완료하는 시간이 水路 전체에 걸쳐서 비슷해 지도록 다양한 선속을 갖는 선박을 각 水路에 배분하는데 둔다면 이 문제는 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

j 水路에 배정된 i 선박의 선속을 V_{ij} 라 하고 水路 j 의 길이를 C_j 라 하면 水路를 통과하는데 걸리는 시간 t_{ij} 는

$$t_{ij} = C_j/V_{ij} \dots\dots\dots (2.2)$$

가 되며, 또 단위 시간당 水路를 통과하는 비율 P_{ij} 는

$$P_{ij} = 1/t_{ij} \dots\dots\dots (2.3)$$

가 된다. 이는 단위 시간당 水路를 항진하는 시간적 기여도가 된다.

2.2 定式化

이상과 같이 정의된 水路에 대한 動的 概念의

交通量 密度에 대한 기여도와 항진시간에 대한 기여도를 기반으로 하여 교통 관리의 목적에 따라 對象 交通量을 水路에 배분하되 각 水路에 대하여 특정 크기의 선박이 특정 水路에 집중 배치되지 않도록 분산 배치하고 동시에 관리 목적이 달성되게하기 위한 目的 函數는 다음과 같이 나타낼수 있다.

목적함수 ; Minimize($\max_j \max_i W_{ij} P_{ij}$)
 (2.4)

여기에서 P_{ij} 는 전술한 관리 목적에 따른 기여도이며 전체 선박을 크기와 속력에 따라 비슷한 특성의 선박들끼리 한 그룹으로 묶어 몇개의 그룹으로 나누었을 때 W_{ij} 는 j水路에 배정된 i그룹 선박의 척수를 나타낸다.

이 문제는 바로 해를 구할 수 없으므로 다음과 같이 변환한다.

m ; 선박의 타입 수(i=1,2... m)

n ; 水路의 갯수(j=1,2... n)

$W = \sum_i \sum_j W_{ij}$; 對象 交通量의 총 척수

Y_{ij} ; 전체 선박 수 W에 대한 W_{ij} 의 비율

라 두면

目的 函數 ; Minimize($\max_j \max_i W Y_{ij} P_{ij}$)
 (2.5)

제한 조건

$$\sum_i \sum_j Y_{ij} = 1 \quad \text{..... (2.6)}$$

$$W, Y_{ij} > 0$$

로 나타낼 수 있다.

이 식을 다시한번 변환하여 나타내기로 하면 $\sum_j Y_{ij} = Y_i, \max_j \max_i W Y_{ij} P_{ij} = e$ 라 할때

제한 조건 ; $\sum_i Y_i = 1$ (2.7)

$W Y_{ij} P_{ij} \leq e$ (2.8)

$Y_i, W, Y_{ij}, P_{ij} \geq 0$ (2.9)

으로 두고

목적함수 ; Minimize e (2.10)

로 쓸 수 있다. 여기서 e는 직접 해를 구할 수 없으므로 목적함수와 식(2.4)에 포함된 e를 제거

하기 위해 식(2.8)의 양변을 e로 나누면

$W Y_{ij} P_{ij} / e \leq 1$ (2.11)

식(2.11)에서 $Y_{ij}/e = K_{ij}$ 라 두면

$W K_{ij} P_{ij} \leq 1$ (2.12)

또 $\sum_i \sum_j K_{ij} = \sum_i \sum_j Y_{ij} / e = \frac{1}{e}$ 로부터

Minimize(e) \rightarrow Maximize $\sum_i \sum_j K_{ij}$ 로 되므로 위의 문제는

목적함수 ; Maximize($\sum_i \sum_j K_{ij}$)

제한조건 ; $W K_{ij} P_{ij} \leq 1$ (2.13)

$K_{ij}, P_{ij} \geq 0$ 로 된다.

이 문제의 해는 목적함수의 성질상 각각의 K_{ij} 를 최대로 하는 값을 구하면 되므로 제한 조건인 식(2.12)에서 $K_{ij} \leq 1/P_{ij} W$ 로부터 다음과 같이 해를 구할 수 있다.

$\sum_j K_{ij} = W^{-1} \sum_j P_{ij}^{-1}$ (2.14)

또 식(2.11)에서 $Y_{ij}/e = K_{ij}$ 라 두었으므로 이를 변형하면

$\sum_j Y_{ij} / e = \sum_j K_{ij}$ (2.15)

$e^{-1} Y_i = \sum_j K_{ij}$ (2.16)

가 되어 식(2.14)와 (2.16)로부터

$\sum_j K_{ij} = W^{-1} \sum_j P_{ij}^{-1} = e^{-1} Y_i$ (2.17)

$e = W Y_i / \sum_j P_{ij}^{-1} = W Y_i \sum_j P_{ij}$ (2.18)

가 된다. 따라서 K_{ij} 를 최대로 하는 문제는 식(2.13)로부터 $K_{ij} = (P_{ij} W)^{-1}$ 가 되고, $Y_{ij}/e = K_{ij}$ 이므로

$Y_{ij}/e = 1/P_{ij} W$ (2.19)

$Y_{ij} = e/P_{ij} W$ (2.20)

식(2.20)에 식(2.18)를 대입하여 정리하면

$Y_{ij} = W Y_i / (\sum_j P_{ij}^{-1} W P_{ij})$
 $= Y_i P_{ij}^{-1} / (\sum_j P_{ij}^{-1})$
 $= Y_i \sum_j P_{ij} / P_{ij}$ (2.21)

단, $i=1,2,\dots,m$
 $j=1,2,\dots,n$

가 되어 교통 관리목적과 船型의 분산 배치를 위한 水路별 선형의 배치 비율을 얻을 수 있다. 그러나 이 문제는 水路별로 배분되는 선박의 척수 W_{ij} 가 정수이므로 分枝定數法으로 그해를 구할 수는 있지만 선박의 종류와 水路의 수가 많아지면 계산량이 방대하게 되므로 다음과 같이 간략하게 근사 최적해를 구할 수 있다.

- 1) $W_{ij}=W \cdot Y_{ij}$ 를 구하고 이 결과를 반올림 처리하여 정수화한 값 W_{ij}^* 를 초기 배분치로 한다.
- 2) $\sum_j W_{ij}^*$ 를 구하고 각 水路에 대해 크기 순으로 나열한다.
- 3) $\sum_j Y_{ij}=W/\sum W_{ij}$ 가 되도록 배분치를 조정한다.

2.3 適用 例

선박 20척이 아래의 내용과 같이 도착하여 水路를 通航하기 위하여 대기중인 때 交通量 密度가 균등하도록 길이가 각기 다른 두개의 水路에 배분하는 문제를 전술한 방법을 적용하여 해를 구하면 다음과 같이 정리된다.

1) 船別列 및 특성

20척의 선박이 수로통항을 위해 대기중인 때 각 선박의 특성은 다음표와 같다고 하자.

2) 通航 水路는 두개이며 그 길이는 다음과 같이 주어진 것으로 한다.

水路1: 8마일 水路2: 12마일

3) 선박의 그룹화

대기중인 선박을 특성 시간을 기준으로 하여 비슷한 것끼리 모아 그룹화하였을 때 표 2-2와 같이 정리되었다고 가정한다.

4) 기여도의 계산

식(2.1)에 의한 기여도의 계산 내용은 다음과

Table 2-2 Description of groups

선박 그룹	척 수	비율(Y)	Pc	Pc ⁻¹
G 1	5	0.25	18	0.05
G 2	7	0.35	23	0.04
G 3	4	0.20	40	0.03
G 4	4	0.20	50	0.02

같다.

기여도 算式: $P_{ij}=P_c^{-1} * C_j$

계산결과; $P_{11}=0.40$ $P_{12}=0.60$

$P_{21}=0.32$ $P_{22}=0.48$

$P_{31}=0.24$ $P_{32}=0.36$

$P_{41}=0.16$ $P_{42}=0.24$

5) 선형별 水路의 配定 比率

선형별 수로의 배정 비율은 식(2.21)에 의해 다음과 같이 구한다.

算式: $Y_{ij}=Y_i \sum_j P_{ij} / \sum_j P_{ij}$

계산결과;

$Y_{11}=0.1$ $Y_{12}=0.15$

$Y_{21}=0.14$ $Y_{22}=0.21$

$Y_{31}=0.08$ $Y_{32}=0.12$

$Y_{41}=0.16$ $Y_{42}=0.12$

6) 선형별 水路의 배정 척수

간략해법에 의해 구한 각 수로별, 선형별 배정 선박 척수는 다음 표와 같이 정리된다.

Table 2-3 Number of ships assigned to channels

	G1	G2	G3	G4
水路 1	2	3	2	3
水路 2	3	4	3	2

3. 通航 順序列의 구성

3.1 문제의 성질 및 정식화

여러개의 水路에 대해 對象 交通量을 교통관리

Table 2-1 Ship's arrival order and her character

도착순서	1	2	3	4	5	6	7	
L(m)	70	200	70	120	200	70	70	--
V(m/sec)	3	4	4	3	4	3	4	--
속장비(Pc; sec)	23	50	18	40	50	23	18	--

의 목적에 따라 배분하였을 때 각각의 水路에서는 그 水路에 할당된 선박을 水路에 진입 시킬 通航 順序列을 구성하는 문제가 발생한다.

일반적으로 待期 行列에 있어서 처리 순서를 결정하는 규칙은⁶⁾ 도착순서에 의해 정해지는 방법(FCFS; first come, first served), 최단 서비스 시간을 우대하는 방법, 후에 들어온 것을 먼저 내보내는 방법(LCFS; last come, first served), 무작위로 보내는 방법(SIRO; service in random order) 등 여러가지가 있을 수 있다.

본 문제에서는 다양한 속력과 길이를 갖는 선박이 水路 進入을 위하여 대기 중인 때 水路 通航이 효율적으로 이루어지게 하기 위하여 最適 通航 順序列을 구하는 방법을 찾고자하며 우선 最適의 通航列을 구성하기 위하여 고려 될 사항들과 그 성질에 대해 살펴보기로 한다.

3.1.1 선박간의 間隔과 선체의 길이

선박이 한 방향으로 열을 이루어 항해할 때 충돌을 예방하기 위해서는 반드시 適正 距離를 선박간의 간격으로 확보해야 한다. 같은 방향으로 직진하는 선박간에 있어서 충돌을 회피하기 위해 요구되는 최소한의 거리를 避航限界라 하며 이 크기는 선박의 巡回試驗 및 선체 운동 방정식의 해를 구함으로써 얻어지는 것으로서 대체로 선체의 길이에 비례함이 확인 되었다. 실제의 문제에 있어서는 상대선의 움직임에서 이상을 발견하고 충돌의 위험 여부를 판단하여 避航 措置가 이루어 지게 되므로 선박간에 확보 되어야 하는 최소한의 安全 距離는 避航 限界에 이러한 판단 및 조치를 위한 시간이 확보 될 수 있는 거리가 附加되어야 하며 이러한 개념에서의 安全 距離를 避航領域이라 한다.⁷⁾

일반적으로 한 선박이 다른 선박과 더불어 水路를 항진할 때에는 길이 방향의 安全 距離가 확보 되어야 할 뿐 아니라 횡방향으로도 적정거리가 확보 되어야 하므로 한 선박을 중심으로 하여 전후방향 및 횡방향으로 일정 크기의 범퍼를 지니는 형태가 이루어지게 되는데 이러한 영역을 閉塞 領域(bumper area)⁸⁾이라 한다. 이 크기는 속력이 비슷하고 크기 역시 비슷한 두 선박간에

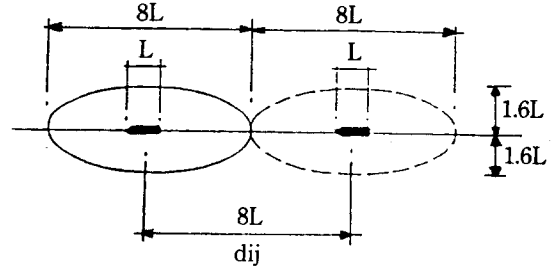


Fig. 3-1 bumper area between ships in navigation scheme

있어서는 한 선박을 중심으로 하여 전후방향으로 각 선체길이 L의 4배, 횡방향으로 좌우 각 1.6배의 여유 수면을 확보해야 하는 것으로 알려지고 있다.

閉塞 領域은 피항영역의 하나이며 전후방 뿐 아니라 횡방향의 여유 수면의 크기를 규정하므로 선박운항에 있어서 필요한 최소한의 占有水域를 나타내는 개념이며 선박의 길이가 다른 경우에는 뒤에 위치하는 선박이 충돌의 위험을 감지하고 피항조치를 취하는 주체가 되므로 이 後行 船舶의 操縱 性能에 가중치를 두는 것이 타당하며 따라서 이 後行 船舶의 길이에 가중치를 둔 두 선박의 평균 길이를 閉塞 領域을 구하는 기본 船長으로한다.

즉, 先行船의 길이를 L_1 , 後行船의 길이를 L_2 라 하면 閉塞 領域의 크기를 구하는 기준이 되는 선박의 길이 L' 는⁹⁾

$$L' = (L_1 + 2L_2) / 3 \text{ 또는 } L' = (L_1 + 4L_2) / 5 \dots\dots\dots (3.1)$$

가 된다.

따라서 길이가 각기 다른 두 선박간의 閉塞 領域 d_{ij} 는

$$d_{ij} = 8L' = 8(L_1 + 2L_2) / 3 \dots\dots\dots (3.2)$$

로 주어진다.

3.1.2 선박간의 間隔과 船速

추월이 허용되지 않는 水路내에서 항진하고 있는 전후의 선박 i, j의 속력을 V_i, V_j 라 할 때 閉塞

領域의 크기 d_{ij} 는 전후의 선박 길이 L_i, L_j 에 의해 결정된다. 따라서 두 선박이 연이어 水路에 진입하는데 있어서 진입 시간 간격은 선속의 차를 고려하여 여하한 경우라도 선박간에 최소한 확보되어야 하는 안전거리로서 閉塞領域 d_{ij} 가 유지 되도록 관리 되어야 한다. 이 경우 선속은 각 선박이 고유의 속력을 유지하는 경우와 필요에 따라 減速을 할 수 있는 두가지의 경우가 발생할 수 있다.

1) 後續船이 제 속력을 고수하는 경우

전후의 선박 i, j 의 속력 관계가 $V_i > V_j$ 인 경우에는 後行船인 j 선박은 先行船인 i 선박이 水路에 먼저 진입한 후 d_{ij} 만큼의 閉塞 領域이 형성 될 때까지 대기한 후 水路에 진입하게 된다.

이 때 선박 i, j 간의 출발 간격 T_{ij} 는

$$T_{ij} = d_{ij}/V_i \quad (\text{단, } V_i \geq V_j) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

가 된다. 그러나 $V_i < V_j$ 인 경우에는 선박 i 가 水路에 진입한 후 선박 j 는 일정 시간 대기 후 출발하여 先行船 i 가 水路를 벗어나는 시점에서 後行船 j 가 i 선박의 후방에 d_{ij} 만큼의 거리를 두고 도착되도록 선박 i, j 간의 水路 進入 時間 간격을 관리해야 한다.

이 때의 선박 i, j 간의 水路 진입 시간 간격 T_{ij} 는

$$T_{ij} = K(L_i + 2L_j)/V_i + C_j(1/V_i - 1/V_j) \quad \dots (3.4)$$

단, $K=8/3$

가 된다. 그러나 $V_i < V_j$ 인 경우에는 선박 i 가 水路에 진입한 후 선박 j 는 일정 시간 대기 후 출발하여 先行船 i 가 水路를 벗어나는 시점에서 後行船 j 가 i 선박의 후방에 d_{ij} 만큼의 거리를 두고 도착되도록 선박 i, j 간의 水路 進入 時間 간격을 관리해야 한다.

이 때의 선박 i, j 간의 水路 진입 시간 간격 T_{ij} 는

$$T_{ij} = K(L_i + 2L_j)/V_i + C_j(1/V_i - 1/V_j) \quad \dots (3.4)$$

단, $K=8/3$

여기에서 前項은 閉塞영역 d_{ij} 가 만들어 지기 위한 대기 시간이 되며 後項은 後續船이 先行船을 추

월 할 수 없으므로 閉塞영역이 水路의 출구 근처에서 확보될 수 있도록 대기하는 시간이 된다.

따라서 식(3.3)와 (3.4)를 포함하여 각 선박이 제 속력을 고수할 때 先後行 船舶간의 水路 進入 時間 간격은 다음과 같은 일반식으로 나타낼 수 있다.

$$T_{ij} = k(L_i + 2L_j)/V_i + \max[C_j(1/V_i - 1/V_j), 0] \quad \dots\dots\dots (3.5)$$

2) 後續船이 減速하는 경우

식(3.5)에서 前項은 先後行 船舶간의 속력차에 관계없이 일정하나 後項은 後續船의 속력이 더 큰 경우 상당한 값을 갖게된다. 따라서 後行船의 출발 시간은 그후에 오는 선박의 대기 시간에 또 영향을 미치게 되므로 전체적인 水路 이용의 效率性을 위해서는 일정 시간 대기 후 제 속력을 유지하여 항

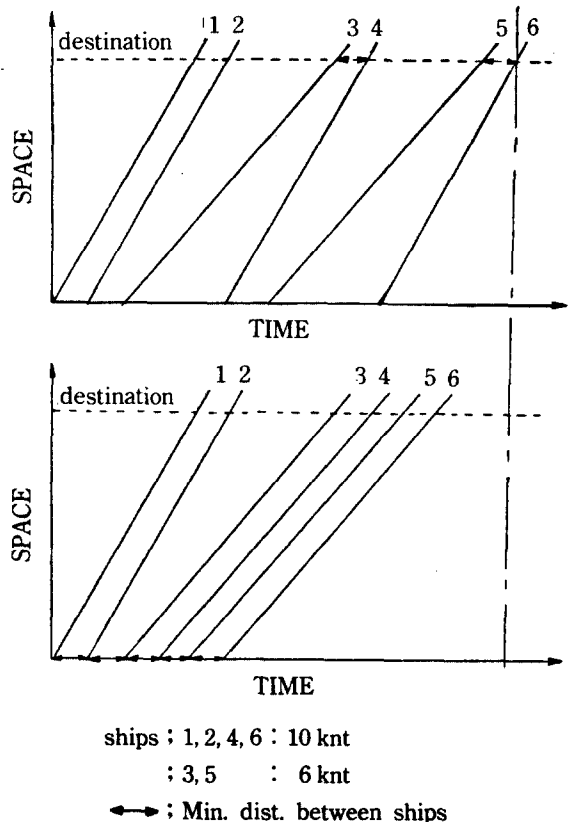


Fig. 3-2 Time-Space diagram

진하는 것과 閉塞領域 확보후 先行船舶의 속력으로 감속하여 항진하는 경우중 어느쪽이 바람직한가에 대한 검토가 필요하게 되며 이 문제는 fig. 2와 같이 Time-space diagram을 통하여 확인되듯이 감속이 보다 효율적인 것을 알 수 있다.

3.2 平均 待期 時間의 최소화

앞에서 확인한 바와 같이 閉塞 領域은 선박의 안전 운항을 위한 최소 安全 距離를 나타내며 식(3.2)에서와 같이 선박의 길이에 차가 있을 때는 그 배치 순서에 따라 그 크기가 달라지므로 通航 순서의 적정 배치를 통하여 한 水路에 배정된 對象 交通量 전체가 水路 進入을 완료할 때까지의 平均 待期 時間이 개선 될 수 있다.

$X_{(i-1), (i)}$ 를 i 번째 선박이 水路에 진입하기 위하여 水路 입구에서 대기하는 시간이라 하고 X_k 를 임의의 K 번째 선박이 水路 진입을 위한 대기시간이라 하면

$$X_k = \sum_{i=1}^k X_{(i-1), (i)}$$

가 되며 X^* 을 전체 선박 n 척의 平均 待期 時間이라 하면

$$\begin{aligned} X^* &= (\sum X_i) / n \dots\dots\dots (3.6) \\ &= (\sum_k \sum_i X_{(i-1), (i)}) / n \\ &= \sum (n-i+1) X_{(i-1), (i)} \end{aligned}$$

로 정리 된다.

3.3 D. P에 의한 알고리즘

선박 j 가 水路를 통과하는데 소요되는 시간을 T_j 라 하면 이 값은 水路에 진입하기 위해 입구에서 대기하는 시간과 水路에 진입하여 水路를 항진한 시간과의 합으로 구성된다. 즉 水路 입구에서의 대기 시간을 X_j , 水路의 길이를 C_j , 선박의 속력을 V_j 라 하면 水路 통과 시간은

$$T_j = X_j + C_j / V_j \dots\dots\dots (3.7)$$

가 되며 n 척의 선박이 水路를 통과하는데 소요되는 시간 F_n 는

$$\begin{aligned} F_n &= \sum_i (X_{ij} + C_j / V_j) \dots\dots\dots (3.8) \\ &= \sum_i X_{ij} + \sum_j C_j / V_j \\ & \quad i=0,1,2,\dots, n-1, j=i+1 \end{aligned}$$

여기에서 前項은 順序列의 변화에 의해 달라지나 後項은 水路 진입 순서열의 구성에 관계없이 일정하므로 전 선박의 通航을 위한 平均 待期 時間을 최소화하는 문제는 식(3.8)의 前項인 X_{ij} 가 최소가 되도록 水路 진입 순서열을 조정하는 문제로 된다.

따라서 목적함수는

$$\text{Minimize} [\sum X_{ij} = k(L_i + 2L_j) / V_i + \max \{ C_j(1/V_i - 1/V_j), 0 \}] \dots\dots\dots (3.9)$$

가 되며 문제를 단순화하기 위하여 전 선박의 길이와 속력을 기준으로하여 비슷한 크기와 속력의 선박을 한개의 그룹으로 묶어 전체 對象 交通量을 몇개의 그룹으로 나누기로 하고 그 내용을 정리하면

- $C \geq 2$; 선박의 그룹수
 - $N_i > 0, i=1,2,\dots, c$; 그룹에 속하는 선박 척수
 - $R_i \geq 0, i=1,2,\dots, c$; 그룹의 대기 척수
 - $T = \sum_i N_i$; 선박 총 척수
 - $X(p, q, R_i)$; 그룹 p, q 간의 대기 시간
 - O_j ; j 번째 통과하는 선박의 그룹
- $1 \leq 0, \leq C(j=1,2,\dots, T)$

따라서 전체 通航에 있어서 平均 待期 時間을 최소화 하는 목적함수는

$$\text{Minimize} \sum_j X(O_j, O_{j+1}) (T-j+1) \dots\dots\dots (3.10)$$

이 문제의 해를 구하는 알고리즘을 動的 計劃法을 통하여 구현하고자 할 때 水路진입 순서를 정하는 조건을 검토해 보면 크게 나누어 선박들이 水路 입구에 도착한 순서를 고려한 경우와 도착 순서를 무시하고 無作爲로 배치하는 경우로 나누어 생각해 볼 수 있다.

3.3.1 선박의 到着 順序를 무시하는 경우

이 경우는 선박의 도착 순서를 무시하고 단지

목적이 되는 水路 진입을 위해 대기하는 시간이 전체 對象 交通量에 대해 평균적으로 최소가 되도록 對象 交通量을 배치하는 정책하에서 通航 順序列을 구성하는 문제가 된다.

$V(L, R_i)$ 를 L 그룹의 선박이 水路에 진입하는 그 시점에서 水路에 진입하기 위해 대기중인 $i(i=1,2,\dots,C)$ 개 그룹의 선박척수 $\sum_i R_i$ 가 모두 水路에 진입하는데 소요되는 최소 시간이라 하면 다음과 같은 回歸式이 성립한다.

回歸式 :

$$V(L, R_i) = 0; R_i = 0, i = 1, 2, \dots, C \dots \dots (3.11)$$

$$\text{Min}[X(L, x, R_i) * \sum R_i + V(X, R_i')]$$

단, $x = [x; R_x > 0]$
 $i = 1, 2, \dots, C$ 에 대해
 $R_i' = R_i - 1; \text{if } x = i$
 R_i ; 기타

3.3.2 到着 順序로부터 順序 變動幅이 제한 된 경우

선박이 도착 순서를 갖고 水路에 진입하기 위해 대기중인 상태에서 水路 진입을 위한 순서를 배치하는 문제는 선박의 측면에서 살펴보면 먼저 도착한 선박은 되도록 지체하지 않고 水路에 진입하기를 원할 것이고 水路를 관리하는 측면에서 의 입장은 도착 순서에 관계없이 水路의 효율성 을 높이는 방향으로 이 순서열을 구성하기를 원 하게 될 것이다.

이렇게 양자의 목적이 상충되는 상황에서 양쪽 의 욕구를 어느정도 충족시키면서 동시에 水路의 效率性이 확보되게 순서열을 구성하는 한 방안으로 원래의 선박 도착 순서를 중심으로하여 그 前後로 일정폭을 두어서 그 범위 내에서만 순서의 변화가 가능하도록하는 정책을 생각할 수 있다. 즉 순서 변동 허용폭을 MPS(Maximum Position Shift)¹²⁾라 정의하기로 하며 예를 들어 MPS 값을 3으로 준다면 도착 순서가 5번째인 선박은 2번째 에서 8번째 사이에서 水路 진입순번이 주어지는 것으로 하는 것이다.

MPS값이 작을수록 도착순서에 충실한 순서열 배정이 되며 클수록 무작위에 가까워져 N척의

선박을 對象으로 한다면 $MPS=N-1$ 이면 완전 무작위로 순서열을 배정하는 문제로 된다.

도착 순서를 완전히 무시한 상태에서 動的 計 劃法을 사용하여 순서열을 구성하는 알고리즘인 식(3.11)을 기본으로 하여 MPS개념을 도입한 순 서열 구성 알고리즘은 다음과 같이 정리해 볼 수 있다.

- $(L, R_1, R_2, \dots, R_C)$; L 그룹의 선박이 진입한 당시 의 대기중인 선박
- $P=T-\sum_i R_i$; 水路에 진입한 선박 척수 로서 현재 진입하는 선박의 진입순번을 제공
- $\{i_1, i_2, \dots, i_T\}$; 선박의 도착 순서별 타임

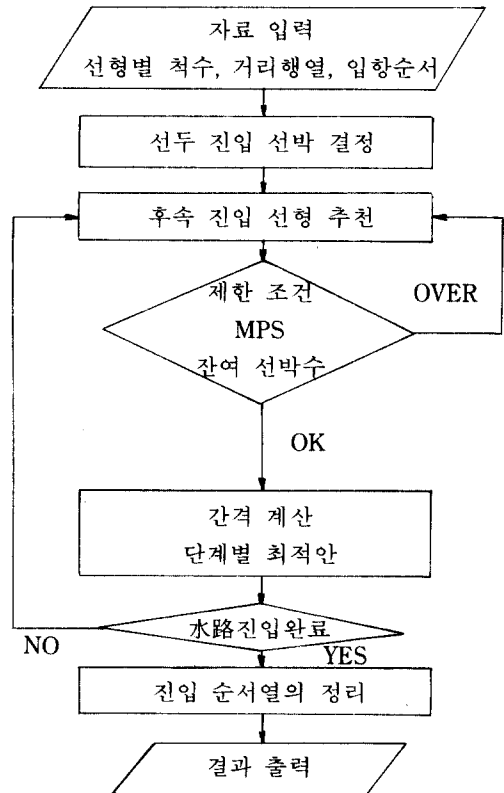


Fig. 3-3 Flow chart of D.P. algorithm for sequencing

$POS(L, N_L - R_L)$; 進入中인 선박이 그 타임에서 몇번째 선박인가를 제공하며

도착 순서에서 L그룹을 탐색하
여 얻음

$SFT = POS(L, N_L - R_L) - P$; 도착 순서로 부터 이
동한 크기 $SFT > 0$; 앞으로 이동

$SFT < 0$; 뒤로 이동

$|SFT| \leq MPS$; 허용폭 내에서만 도착 순서로
부터 水路 진입순서가 조정 될
수 있음을 나타내는 제한 조건
이 조건들을 3.3.1의 경우에 추가하여 정식화 하
면

$$V(L, R_i) = \infty; |SFT| > MPS \dots\dots (3.12)$$

$$0; |SFT| \leq MPS$$

$$R_1 = R_2, \dots, R_c = 0$$

$$\text{MIN}[X(L, x, R_i) * \sum R_i + V(X, R_i)]$$

단 $x = [x : R_x > 0]$

$i = 1, 2, \dots, C$ 에서

$$R'_i = R_i - 1; \text{IF } i = x$$

R_i : 기타

3.4 適用例

이상에서 설명한 바와 같이 선박의 水路進入 순
서를 결정하는 과정에서 순서열 구성 목표를 對象
交通量 전체의 平均 待期 時間을 최소화 함에 두
었을 때 도착 순서를 무시한 경우와 도착 순서를
고려하여 일정폭 내에서만 조정이 이루어지게 하
는 두가지의 경우에 대해 動的 計劃法을 사용하여
구성 알고리즘을 구현하였다. 실제 적용의 예를
다음과 같이 선속이 다양하되 감속하지않고 제 속
력을 고수하여 水路를 航進하는 경우와 水路내에
서 일정 속도로 감속하여 항진하는 두가지 경우에
있어서 MPS의 폭을 변화 시키면서 그 결과를 살
펴 보았다.

1) 船速이 다양한 경우

(1) 선박의 그룹화

전체 25척의 선박을 그 길이와 속력이 같은 것
끼리 묶어 그룹화 하였을 때 그 결과가 다음과 같
이 주어졌다고 하자.

(2) 그룹 선박간 출발 간격(분)

각 그룹간의 水路진입 시간 간격은 식(3.4)에
의해 다음과 같이 주어진다.

Table 3-1 description of groups

	G1	G2	G3	G4	G5
길이	70	70	120	120	200
속도	6	8	6	8	8
척수	5	5	5	5	5

Table 3-2 Entrance interval time between
ship's groups

	G1	G2	G3	G4	F5
G1	3	43	5	45	47
G2	2	2	4	4	5
G3	4	44	5	45	48
G4	3	3	4	4	6
G5	4	4	5	5	7

(3) 선박의 到着 順序

선박의 도착 순서열의 그룹별 내용이 아래의
가)와 같고 또 이 도착 순서열에 따라 水路 진입이
이루어 졌을 때 대기 시간이 나)와 같다.

가) 順序列; 5,2,2,4,3,4,1,2,3,1,4,3,5,5,1,3,2,4,1,
5,4,2,5,1,3

나) 累積 待期 時間: 4506분

平均 待期 時間: 180분

(4) 順序列의 構成 結果

MPS의 범위내에서 대기 시간이 최소화 되도록
통항 순서를 조정 배치하여 정리한 결과는 다음
표와 같다.

Table 3-3 Results of sequencing ships with
MPS

M P S	3	5	10	15	20
累積 待期時間	2341	1994	1410	1218	1185
平均 待期時間	94	80	56	49	47

2) 船速이 일정한 경우

水路내를 항진하는 선박들의 속력이 일정한 경
우(6노트) 선박의 크기에 따라 3개의 그룹으로 전
체 對象 交通量 25척을 분류하여 순서열을 구성해
본 결과를 나타내면 다음과 같다.

(1) 그룹별 척수

길이에 따라 대상 교통량을 그룹화하여 정리한
결과는 다음과 같다.

Table 3-4 Description of ship's group

그 룹	G 1	G 2	G 3
길 이	70 M	140 M	210 M
척 수	10	8	7

(2) 그룹간 출발 간격

그룹간 水路 진입을 위해 대기하는 시간 간격은 식(3.4)에 의해 다음 표와 같이 주어지며 이때 선박의 항진 속력은 6노트로 하였다.

Table 3-5 Entrance interval time between ship's group

	G 1	G 2	G 3
G 1	3	5	7
G 2	4	6	8
G 3	5	7	9

(3) 초기 조건

선박이 水路 입구에 도착한 순서가 그룹별(가)와 같이 주어졌다 할 때 도착 순서대로 선박들을 水路에 진입 시킨 경우의 결과는 나)와 같다.

가) 到着列 : 2,1,3,2,3,3,1,2,1,1,2,1,2,2,1,1,3,1,2,3,3,1,2,3,1

나) 累積 待期 시간 : 1689분

平均 待期 時間 : 68분

(4) 順序列 구성 결과

초기 조건에 의한 입항렬을 중심으로 하여 MPS를 변화시키면서 상태의 변화를 확인해 본 결과는 다음과 같다.

Table 3-6 Results of sequencing with MPS

MPS	3	5	10	15
累積 待期 時間	1519	1462	1360	1306
平均 待期 時間	61	58	54	52

4. 結 論

海上 交通量 管理의 정책 目標을 水路 內에서의 安全 確保와 船舶이 복주하는 경우에 있어서 水路 通航이 效率적으로 이루어지도록 管理하고자 할 때 이 目標을 達成하기 위한 管理 方法을 복수개로 주어지은 管理 對象 水路에 對象 交通量을 交通 密度가 均등하도록 配分하는 問題와 이렇게 配分된

交通量을 水路 이용이 效率적으로 되도록 水路 進入 順序를 定하는 二단계의 問題로 나누어 다음과 같이 정리하였다.

1) 交通量을 配分하는 問題는 MIN MAX MAX 問題를 통하여 定式化 하고 適用 例를 통하여 그 有用성을 보였다.

2) 船舶이 一方向으로 單線通航列을 이루며 水路를 航行한다는 條件하에서 船舶간에 유지되어야 하는 最小의 距離를 구하는 問題를 정리하고 이를 基礎로하여 길이 各기 다른 船舶들이 水路 진입을 위해 대기중인 때 水路의 진입 順序를 配치 함에 의해 對象 船舶들의 水路 진입을 위한 平均 待期 時間이 最小가 되도록 함으로써 效率적인 水路 通航이 이루어 지도록 順序列을 구성하는 問題를 動的 計劃法을 이용하여 해결 알고리즘을 구성 하였다.

3) MPS 개념을 도입하여 到着順序와 效率性間의 상반되는 問題를 동시에 원만히 해결하는 알고리즘을 제시하고 適用 例를 통하여 有用성을 보였다.

참고문헌

- 1) 우리나라 沿岸의 海上 交通 管理 시스템 設置를 위한 기초 연구 : 한국해양대학 부설 해사 기초과학 연구소, 1988
- 2) Wlodzimierz Filipowicz : Traffic Control in Separation Schemes, Journal of Navigation, vol. 36.
- 3) 윤명오 : 海上 交通量의 效率의 管理 方案에 關하여(I) : 韓國航海學會誌, vol. 15
- 4) , 5) 原 潔 : 海上交通工學, 海文堂, 1981, pp. 47-54.
- 6) Ronald V. Hartley : Operation Research, Goodyear, 1976, pp. 579-581
- 7) , 8), 9) 原 潔 : 前掲書, pp. 111-112, pp. 120-123
- 10) E. G. Frankel : Port Planning and Development, John Wiley and Sons, 1987 pp. 363-369
- 11) A. J. Mason : Minimizing Flow Time on a Single Machine with Job Classes and Setup Times, Naval Research Logistics, vol. 38, 1991