

□ 論 文 □

航海水路 能力算定 模型 檢討

(Navigational Channel Capacity Models)

林 鎮 秀

(海運產業研究院)

目 次

- | | |
|---------------------------|------------------------------------|
| I . 序 論 | V . 模擬實驗 模型(SIMULATION MODEL) 및 例題 |
| II . 水路 能力算定 模型 | |
| III . 先入先出 原則 模型 | VI . 結 論 |
| IV . 高速船 優先 및 高價船 優先原則 模型 | |

ABSTRACT

As a result of the lack of methodology for the determination of navigational channel capacity and the consequence lack of effective management of traffic, navigational channels are often grossly underutilized or highly congested. The traditional rule of first-come-first-served admission of vessels to channels is not efficient as it assumes equal time intervals between entrance of consecutive vessels.

A new vessel traffic management system is developed in this research and methodologies to measure the improvement in the channel capacity are developed. Methodology to measure the channel performances for three queue disciplines are developed. The effects of changes in major factors on the channel capacity model such as channel length, fleet mix and arrival rate, as well as changes in strategy are analyzed. Under given channel conditions, best strategy are recommended.

Also, a method for effective stochastic channel capacity simulation was developed. The results of analysis and assertions are compared with the results of simulation runs to prove their applicability

I. 序 論

航海水路(Navigational Channel)는 선박이 外海로부터 港灣으로 들어오는 主通路이다. 선박의 안전운항을 위하여 航海水路는 充分한 水深과 幅을 維持하여야 한다. 많은 港灣의 경우 船舶入港 항로의 水深이 충분치 않으므로 많은 費用을 들여서 浚渫을 하고 있다. 그러므로 航海水路의 效率的인 利用은 航海水路 內의 安全만큼 重要하다.

航海水路의 能力(Capacity)은 일반적으로 일정기간동안 水路內의 일정지점을 通過하는 最大可能한(Maximum Practical) 선박의 숫자 또는 物動量(Throughput Tonnage)으로 定義된다. 그러나, 이 水路能力을 求하는 方法에 대하여는 거의 연구가 안되어 있는 실정이다. Bottoms[8]는 水路能力을 구하는데 最大能力(Maximum Tonnage Capacity)을 구한 후 기준수로의 실적들과 비교하여서 水路의 實質 最大能力(Practical Tonnage Capacity)을 구하였다. 水路의 最大能力은 다음의 條件이 갖추어졌을 때 얻을 수 있다. 그 조건들은 水路內 모든 船舶間의 거리 간격이 最小 安全距離이고, 水路內에서 最大 許容速度로 운행하며, 항상 水路入口에 많은 선박이 대기하고 있어서 水路에 계속해서 船舶이 進入하여야 하며, 모든 水路通過 船舶은 水路가 수용할 수 있는 최대크기의 船舶이고 또 그 船舶들은 貨물을 満載하여야만 한다. 물론 이 最大能力의 조건은 현실적으로 불가능하므로 既存水路의 실적 및 경험을 통해서 水路 最大能力의 약 25% 정도가 水路의 實質 最大能力으로 하여 水路能力을 구하였다. 그러나 이는 아무런 이론적 근거가 없으며, 각 水路의 조건이 다르므로 일률적으로 사용하기에는 문제가 있다. 또한 앞서 航海水路의 能力의 定義에서 '最大可能한(Maximum Practical)'이라는 文句는 그의 해석에 있어서 불명확하므로, 본 논문에서는 새로운 航海水路 能力의 定義를 다음과 같이 제안하고자 한다.

航海水路의 能力은 주어진 水路의 混雜度(Level of Channel Congestion, 例를 들자면 平均待機時間)에서의 일정기간 동안의 最大通過 船舶숫자 또는 物動量으로 정의되어야 한다. 즉 2개의 變數(Congestion Level과 Maximum Arrival Rate)로서 정의되어야 한다. 이러한 意味에서 볼때 航海水路의 能力은 水路의 物理的 條件 뿐만 아니라 航海速度, 運營方法 및 倒着船舶의 크기분포 등에 의해서도 決定이 된다고 볼 수 있다.

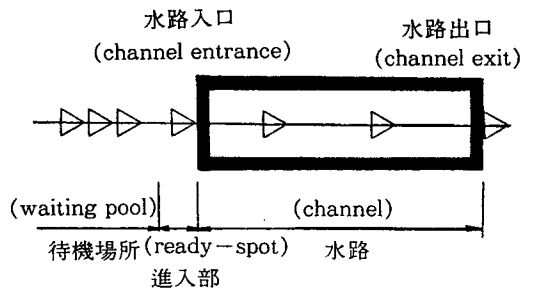
本 論文에서는 새로운 航海水路의 定義에 입각하여 주어진 水路에서의 水路運用原則에 따른 平均船舶 待機時間 및 그에 상응하는 最大通過船舶 숫자 또는 物動量을 살펴보고자 한다.

II. 水路能力 算定 模型

1. 模型 說明

水路能力 算定 模型의 物理的 構造는 3段階로 - 待機場所(Waiting Pool), 進入部(Ready-Spot), 水路(Channel) - 構成되어 있다 (<그림 1> 參照).

外海로부터 도착한 船舶은 待機場所에서 자기의 차례를 기다린다. 進入部に 있는 船舶이 水路로 들어가면 待機場所에 있는 船舶중 제일 優先順位가 높은 船舶이 進入부로 移動한다. 이때 進入부로 이동한 船舶은 優先順位에 관계없이 다음번 水路로 進入하는 船舶이



<그림 1> 水路能力 算定 模型

된다. 進入部に 있는 船舶은 직전에 水路로 들어간 船舶이 水路入口로 부터 充分한 거리를 航海하면 이어서 水路에 進入한다.

2. 假 定

1) Plumlee[1]와 Fratar et al.[2]의 조사에 의하면, 일정시간 동안 항만에 도착하는 船舶數의 분포는 포와송 확률(Poisson Distribution)分布에 상당히 일치됨을 보여주고 있다. 그들의 조사는 中南美의 14개 港灣과 美國의 8개 港灣에서 행하여 졌는데 실제의 船舶 倒着時間 間隔 분포와 확률분포로 豫測한 時間間隔 분포는 각각 81.5%~98.5% 및 78%~92.8%의 높은 일치율을 보였다. 그러므로 本 論文에서는 船舶이 水路에 포와송 形態(Poisson Manner)로 倒着한다고 假定한다.

2) 水路의 入口와 出口 부근에 충분한 水深의 넓은 장소가 있다고 假定함으로써 待機船舶의 숫자는 無限히 클수 있고 또한 水路의 航海를 마친 船舶은 水路를 航海하는 船舶의 進行을 방해하지 않는다.

3) 일단 水路內를 進入하는 船舶은 그 船舶의 特性에 따라 水路內에서 일정한 速度를 維持한다.

4) 船舶間의 水路內에서의 最小 距離間隔은 어떠한 境遇에도 지켜져야 한다. 즉 앞서 進行하던 船舶이 坐礁등으로 인하여 정지되었을 경우 뒤따라오던 船舶은 앞 船舶에 추돌되지 않을 充分한 거리를 항상 維持한다.

5) 水路를 利用하는 종류별 船舶의 비율(Fleet Mix)은 항상 일정하다고 본다.

6)에인선, 도선사 등의 부족으로 인한 船舶 進行의 遲滯는 없고 颱風이나 氣候條件 등으로 인한 水路의 閉鎖는 없다고 假定하며, 하루 24시간 항상 水路를 利用할 수 있다고 가정한다. 또한 바람, 파도, 조류등의 影響을

안받는다. 잘 보호된 水路로 假定한다.

7) 水路는 通航分離 水路로서(Two-Way Traffic Configuration) 入港하는 船舶과 出港하는 船舶이 서로에 干涉을 안받고 이용할 수 있다.

3. 水路運用原則(Queue Discipline)

水路運用原則은 待機場所에서의 優先順位를 정하는 原則을 말한다. 本 論文에서는 3가지 原則에 대하여 考慮해 보았다.

1) 先入先出原則(First-Come-First-Served discipline : FCFS)

先入先出原則은 문자 그대로 먼저 도착한 배가 먼저 水路에 進入하는 原則으로 대부분의 港灣에서 채택되는 방법이다.

2) 高速船優先原則(Faster-vessel-first discipline : FAST)

待機場所에 대기하고 있는 船舶들 중 速度이 가장 빠른 배가 그 도착시간과는 無關하게 優先順位를 갖는 原則을 말한다. 이때의 速度이란 水路航海速度를 뜻한다.

3) 高價船優先原則(Higher-cost-vessel-first discipline : COST)

待機場所에 대기하고 있는 船舶中 船舶費用(ship cost)이 가장 비싼 배가 그 倒着時間과는 무관하게 優先順位를 갖는 原則을 말한다.

4. 最小距離間隔

最小距離間隔은 水路內에서 앞의 배가 갑자기 停止를 하거나 坐礁되었을 경우 뒤에 따라오는 배가 즉시 停止를 시작하였을 경우 정지된 배에 추돌하지 않을 充分한 距離間隔을 의미한다. 이 最小距離間隔은 水路內의 모든 지점에서도 維持되어야만 한다. 最小距離間隔은 船舶의 水路內에서의 정지거리와 安全여유(safety margin)로 구성되어야 한다. 그러나 船舶의 정지거리에 대하여서는 많은

研究가 안되어 있는 현실이며, 특히 水路內에서의 정지거리에 대하여는 거의 연구결과가 없는 실정이다. 水路內에서는 침수효과(shallow water effect) 및 水路 側面과의 간섭효과(interaction between vessel and banks)가 考慮되어야 하며, 水路內에서의 船舶의 정지시의 船舶의 조정은 제한된 범위안에서만 행하여져야 하므로 深海에서의 선박정지보다는 더 길게 된다[3]. 本 論文에서는 PIANC (Permanent International Association of Navigational Congress)가 제안한 船舶停止距離에 관한 경험식을[4] 引用하기로 한다. 深海에서의 船舶停止距離에 관한 경험식은 다음과 같다.

$$Dd = 4L \times (V_o/2.5)^{.75} + L \dots\dots\dots(1)$$

- Dd : 정지거리(m)
- L : 선박의 길이(m)
- V_o : 선박속도(m/sec)

本 論文에서 사용할 水路內에서의 最小距離間隔은 (1)식의 결과에 위에서 언급한 水路의 특성을 고려한 여유치 50% 및 안전여유 20%를 고려해서 사용한다. 이 여유치에 대한 확고한 이론적 根據는 없지만 추후 本 論文에서 살펴볼 水路條件이 水路能力에 미치는 영향을 분석하는 데에는 아무 지장이 없다. 그러므로 最小距離間隔은 다음식으로 表現된다.

$$D = 1.2 \times 1.5 \times Dd = (2.2V_o^{.75} + 1.8) \times L \dots\dots\dots(2)$$

- D : 最小距離間隔(m)
- V : 船舶速度(Knots)
- L : 船舶길이(m)

5. 水路入口에서의 最少時間 間隔

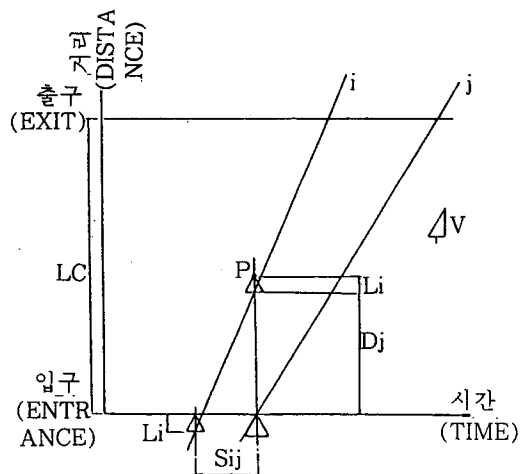
水路入口에서의 最小時間 間隔은 연속해서 水路에 進入하는 두 선박간의 최소한 水路進入時間 間隔을 뜻한다. 즉 이 最小時間 間隔以上으로 水路 進入을 하여야만 全 水路區間

에서 最小距離間隔을 維持할 수 있다. 이 最小時間 間隔을 계산하는 데는 크게 두가지 경우로 나눌 수 있다. 앞서가는 船舶의 水路航海速력이 빠른 경우와 그 반대의 경우이다. 편의상 앞서가는 船舶의 종류를 i라 하고 따르는 船舶의 종류를 j라 하자. 따라서 V_i, L_j는 따르는 船舶(進入部를 차지하고 있는 船舶)의 속력 및 길이를 나타낸다.

1) V_i > V_j인 경우

時間-空間 圖表를 이용하면 두 선박의 水路內에서의 相關關係를 쉽게 알 수 있다. 이 圖表에서는 가로축은 時間을 나타내며 세로축은 水路入口로부터의 距離를 나타내며 圖表上的 直線들은 각 船舶의 軌跡을 나타낸다. (그림 2)에서 보는 바와 같이 先行船舶의 速력이 더 빠른 경우에는 선박간의 最小距離가 水路入口에서 나타난다. 그러므로 船舶 j는 船舶 i가 P點(入口로부터 船舶 j의 最小距離間隔에다 船舶 i의 길이를 더한 거리)을 통과할 때까지 進入部(Ready-spot)에서 대기하다가 水路로 進入할 수 있다. 그러므로 이 경우 最小時間間隔 S_{ij}는

$$S_{ij} = \frac{D_j + L_i}{V_i} \dots\dots\dots(3)$$



(그림 2) 先行船舶의 速력이 빠른 경우(V_i > V_j)

로 表現된다. 이때 D_j 는 식(2)에서 求할 수 있다.

2) $V_i > V_j$ 인 경우

이 경우에는 <그림 3>에서 보는 바와 같이, 水路出口에서 선박간의 最小距離가 나타난다. 그러므로 이 경우에는 船舶 i 가 Q 點에 이를 때까지 船舶 j 는 水路入口에서 待機하여야 한다. 즉 船舶 i 가 <그림 3>의 X 만큼 더 航海할 동안 船舶 j 는 기다려야 한다. 간단한 幾何를 이용해서 最小時間 間隔을 구하면

$$S_{ij} = \frac{D_j + L_i}{V_i} + (LC - D_j) \left[\frac{1}{V_i} - \frac{1}{V_j} \right] \dots\dots\dots(4)$$

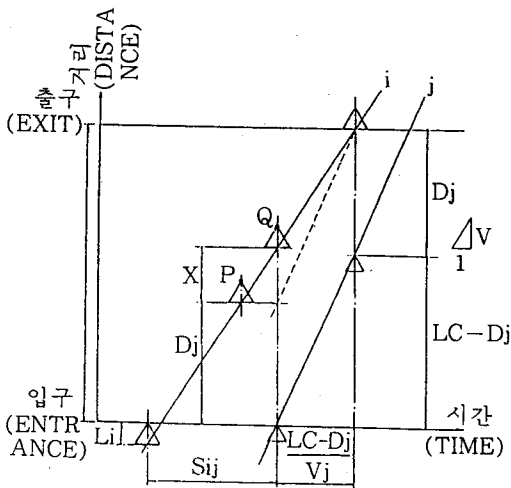
LC : 수로의 길이

가 된다.

式(3)과 式(4)를 하나의 式으로 합치면 다음과 같이 表現할 수 있다.

$$S_{ji} = \frac{D_j + L_i}{V_i} + (LC - D_j) \text{Max} \left[\left(\frac{1}{V_i} - \frac{1}{V_j} \right), 0 \right] \dots\dots\dots(5)$$

그러므로 水路入口에서의 最小時間 間隔은 連續되는 두선박의 特性들 (最小距離 間隔,



<그림 3> 先行船舶의 速力이 느린 경우($V_i < V_j$)

速度, 길이) 뿐만아니라 水路길이에도 관계된다.

Ⅲ. 先入先出原則 模型

1. 서비스 시간(Service Time)

앞에서도 기술한 바와 같이, 어떤 船舶이 進入部(ready-spot)에 倒着하였을때 앞서 水路에 들어간 船舶의 水路進入 時刻과의 차이가 最小時間 間隔(S_{ij})보다 적으면 進入部에서 기다려야 한다. 즉 先行船舶이 水路의 入口部分을 차지하고 있기 때문에 다음 船舶이 水路에 못들어 오는 것이다. 그러므로 水路能力 模型은 待機理論模型(queueing model)과 상당히 유사하다고 할 수 있다. 즉 待機理論의 서비스 시간의 개념과 本 模型의 最小時間 間隔은 같은 概念으로 대응된다. 그러나 待機理論에서의 서비스 시간은 獨立的이고 동일한 분포함수(independent and identical distribution)를 따르는데 반하여 最小時間 間隔은 後行船舶의 特性에도 관계하므로 從屬的(dependent)이며 또한 자체선박의 特性에 따라 그 분포가 달라지므로 동일하지도 않다.

式(2) 및 式(5)에 의하면 最小時間 間隔, 즉 先行船舶의 서비스 시간(S_{ij})은 水路길이, 先行船舶의 속도, 길이와 後行船舶의 속도와 길이에만 關係되고 先行船舶前에 水路에 진입한 船舶들이나 後行船舶 이후의 선박과는 無關係하다는 것을 알 수 있다. 즉 先行船舶의 서비스 시간은 後行船舶의 特性에 따라서 길어질 수도 짧아질 수도 있다고 볼 수 있다. 이는 高速船 優先原則 또는 高價船 優先原則의 적용에 中대한 動機를 부여한다.

2. 平均待機時間

편의상 전체 船隊중 type j 의 선박의 비율은 P_j 라 하고 현재 水路에 막 進入한 船舶의 종류를 i 라 하자. 이 船舶의 서비스 시간이 S_{ij} 일 확률은 바로뒤에 쫓아오는 船舶의 종류

가 j일 확률과 같다. 우리가 앞장에서 船舶의 水路의 倒着은 포와송 形態(Poisson Manner)에 의한다고 했고 先入先出原則이 적용된다고 했으므로 그 확률은 Pj이다. 좀더 일반적인 경우를 살펴보면, 어느 水路에 k번째 倒着하는 船舶의 서비스 시간이 Sij일 확률은

$$\begin{aligned}
 \text{Prob}[\cdot] &= \text{Prob}[T_k=i, T_{k+1}=j] \\
 &= \text{Prob}[T_k=i] \cdot \text{Prob}[T_{k+1}=j | T_k=i] \\
 &= \text{Prob}[T_k=i] \cdot P_j \\
 &= \sum_{m=1}^N \text{Prob}[T_k=i | T_{k-1}=m] \cdot \\
 &\quad \text{Prob}[T_{k-1}=m] \cdot P_j \\
 &= P_i \sum_{m=1}^N \text{Prob}[T_{k-1}=m] \cdot P_j \\
 &= P_i \cdot P_j \dots\dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

T_k : k번째 도착하는 선박의 Type

으로 표현된다. 式(6)은 k의 함수가 아니므로, 전체적으로 다시 말하면 모든 船舶의 서비스 시간의 분포가 동일하다고 볼 수 있다. 그러나 이 사실은 全體 平均待機時間의 계산에만 해당되지 주어진 어떤 船舶種類(예를 들면 船舶種類 i)의 平均待機時間의 계산에는 적용되지 않는다.

이러한 사실로 先入先出原則하의 水路能力 模型은 동일한 形態의 船舶이 포와송 形態로 倒着하며 서비스 시간이 Sij일 확률이 PiPj인 M/G/1/∞의 待機行列 模型(Queueing Model)과 동일하게 된다. M/G/1待機行列 模型의 결과 [5, 6]를 이용해서 平均待機時間 W_q를 구하면

$$\begin{aligned}
 W_q &= \frac{\lambda E[S^2]}{2(1-\lambda E[S])} \\
 &= \frac{E[S^2]}{2(1-\lambda E[S])} \dots\dots\dots(7)
 \end{aligned}$$

W_q : 平均待機時間
λ : 단위시간당 도착선박수
E[S] : 평균 서비스 시간
E[S²] : 서비스 시간의 2차 모멘트

가 된다. 式(7) 및 Little의 公式[7]으로 부터 平均待機 船舶數 L_q는

$$\begin{aligned}
 \bar{L}_q &= \lambda W_q \\
 &= \frac{\lambda^2 E[S^2]}{2(1-\lambda E[S])} \dots\dots\dots(8)
 \end{aligned}$$

가 된다. 또한 안정상태 조건(Steady State Condition)으로부터 水路가 처리할 수 있는 最大許容 單位時間當 倒着船舶數는

$$\begin{aligned}
 \lambda_{max} &= \mu \\
 &= 1/E[S] \dots\dots\dots(9)
 \end{aligned}$$

가 된다. 式(7)과 式(9)에서 보는 바와 같이, 평균 서비스 시간이 줄면 平均待機時間을 줄일 수 있고 동시에 最大許容 單位時間當 倒着 船舶數도 는다. 또한 일반적으로 水路內에서의 航海速力을 높이면 서비스 시간은 감소하나 水路內에서의 航海速力을 높이려면 보다 깊고 넓은 水路를 필요로 하게 된다. 넓고 깊은 水路는 당연히 많은 浚渫費를 誘發하게 된다. 그러므로 긴 待機時間으로 인한 經濟的 損失과 높은 浚渫費간의 經濟性 分析이 또한 必要하다.

IV. 高速船優先 및 高價船 優先原則 模型

先入先出原則下에서는 船舶의 倒着順序와 水路進入順序가 안바뀌는 점을 이용해서 M/G/1待機行列 模型으로 解釋해서 平均待機時間 公式를 유도하였다. 그러나 高速船優先 및 高價船 優先原則의 경우 船舶의 水路進入順序가 水路倒着順序와 다르고 또한 그 바뀌는 정도가 얼마나 水路가 붐비느냐에 따라서 변하기 때문에 先入先出原則下에서와 같이 公式를 유도할 수 없다. 그러므로 平均待機時間 分析 또는 最大許容 單位時間當 倒着 船舶數를 구하려면 模擬實驗 模型(Simulation Model)의 開發이 必要하다.

1. 高速船 優先原則 模型(Fast-Vessel-First Discipline)

高速船 優先原則은 待機場所에서 待機하고 있는 船舶中 水路內 航海速度가 가장 빠른배가 倒着한 順序에 관계없이 먼저 水路入口에 들어가는 원칙이다. 이렇게 함으로써 式(5)의 右변의 두번째 항의 값을 없애 줌으로써 전체적인 平均 最小時間 間隔을 줄여 궁극적으로 平均待機時間을 줄이고 最大 許容單位時間當 倒着船舶數를 늘린다. 즉 아무런 投資 없이 政策의 變換으로 水路能力의 向上을 기할 수 있다. 그러나 運營상의 複雜性이 야기 될 것이고 衡平의 원칙에 벗어나는 점이 있다.

高速船 優先原則下的 水路能力 模型은 待機理論 中の 非先占的 優先順位 待機行列(Nonpreemptive Priority Queue)과 같은 형태를 취한다. 그러나 앞에서 지적한 바와 같이 이 경우에는 각 船舶의 서비스 시간의 분포를 豫測할 수가 없기 때문에 실제적으로 非先占的 優先順位 待機行列 理論을 도입할 수 없다. 그러므로 이 原則下的 模型을 分析하려면 模擬實驗 模型(Simulation Model)의 개발이 필요하다.

이 模擬實驗의 결과를 통해서 다음과 같은 사실을 알아낼 수 있다. 예상했던 대로 바쁜 水路의 경우 平均待機時間은 先入先出原則의 경우보다 현저히 줄어든다. 그러나 한가한 水路의 경우는 그 효과가 적거나 오히려 平均待機時間이 약간 느는 경우가 있으나, 한가한 水路의 경우에는 高速船優先의 原則 자체가 適用할 필요가 없으므로 우리의 考慮對象에서 제외된다. 水路內의 航海速度가 느린 大型油槽船등은 高速船 優先原則에 의하면 優先順位가 낮아서 水路進入 順序가 늦어지나 전체적으로 高順位船舶들의 서비스 시간이 줄어들기 때문에 低速 大型油槽船의 平均待機時間은 先入先出原則의 경우보다 증가 또는 감소한다고 일률적으로 말할 수 없고 선대의

구성비(Fleet Mix), 單位時間當 倒着船舶數(Arrival Rate)등에 따라 좌우된다.

2. 高價船 優先原則 模型(Higher-Cost-Vessel-First Discipline)

高價船 優先原則은 待機場所에서 待機하고 있는 船舶中 가장 高價의 船舶이 倒着한 순서에 關係없이 먼저 水路入口에 들어가는 原則이다. 이 原則에 따르면 많은 경우에 있어서 式(5)의 右변의 두번째 항의 값이 플러스 값을 갖게 되어 高速船原則의 경우와는 반대가 되어서 平均待機時間은 늘게 된다. 하지만 高價船의 平均待機時間은 줄기 때문에 전체적인 平均待機費用은 줄게 된다.

또한 바쁜 水路의 경우에는 待機船舶이 많으므로 低價船은 그 水路 進入차례가 뒤로 밀리게 되나 같은 種類의 船舶이 몰려서 들어 가게 되므로 각각의 서비스 시간이 줄어들게 되어서 경우에 따라서는 全體平均 待機時間도 줄게 된다. 高速船優先 및 高價船 優先 原則 模型의 경우는 周邊條件-水路內 航海速度 分布, 船隊의 構成分布, 單位時間當 倒着船舶數등-에 따라 상황이 바뀌게 되므로 模擬實驗 模型을 이용해서 分析하여야 한다.

V. 模擬實驗 模型(Simulation Model) 및 例題

1. 模擬實驗 模型

模擬實驗 模型의 장점은 실제의 자료를 이용할 수 있고 論理(Logic)의 흐름이 실제상황과 같으며 또한 약간의 修正으로 많은 다른 政策등을 檢討해 볼 수 있다는 점이다. 이 論理의 흐름이 실제상황과 같다는 模擬實驗 模型은 앞서 水路能力 算定模型 說明에서 표현한 船舶의 水路 進入順序대로 똑같이 진행하게 된다. <그림 4>는 이를 圖式的으로 보여준다. 本 水路能力 算定模型은 다음 船舶이 倒着하기 前까지는 서비스 시간이 정해지지 않기 때문에 일반적인 待機行列模型 프로그램

램으로 처리할 수 없다. 따라서, 다음과 같은 방법으로 模擬實驗 模型 프로그램을 작성하

였다.

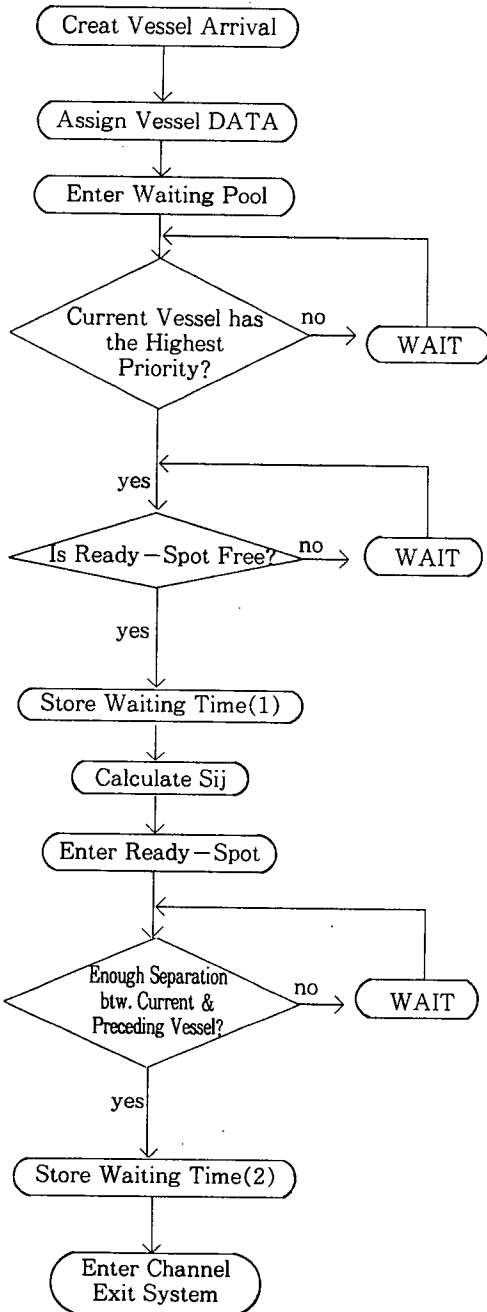
주어진 단위시간당 到着 船舶數에 맞춰 포와송 분포에 따라서 船舶의 도착이 發生한다. 다음 이 도착한 船舶에 주어진 船隊의 분포 (Fleet Mix)에 맞춰 船舶에 관한 特性을 부여하고 그 船舶은 待機場所로 들어간다. 이 船舶의 현재의 優先順位를 선박의 到着時刻, 특성 및 운용원칙에 따라 정한다. 이 優先順位는 새로운 선박이 도착하면 다시 정해지게 된다. 最優先順位 船舶은 進入部(Ready-Spot)가 비워지면 즉시 이 자리를 채우게 된다. 進入部に 도달한 시각과 待機場所 到着時刻과의 차이를 待機場所에서의 待機時間으로 기록한다. 進入부에 船舶이 채워지면 직전에 水路에 들어간 船舶의 서비스 시간 S_{ij} 를 계산해서 水路 進入船舶의 진입시각과 현 시각과의 시간차가 S_{ij} 보다 크면 즉시 水路에 進入하고, 그렇지 않으면 그 차이만큼 進入部에서 기다리고 그 시간 차이를 記錄한다. 이 시간차와 앞서 계산한 待機場所에서의 待機時間을 합하면 해당선박의 待機時間이 나온다. 船舶이 水路에 進入하면 필요한 資料를 기록하고 그 船舶은 모형에서 떠난다. 이 個個 船舶의 待機時間을 통계처리 하여서 平均 待機時間, 각 船舶 種類別 待機時間, 平均 待機費用 등 필요한 資料를 계산한다.

2. 例題

模擬實驗 模型의 例題로서 다음과 같은 경우의 水路에 대하여 분석해 보았다. 어떤 水路에 到着하는 船舶의 種類는 3種類이며 각 種類別의 船舶에 관한 資料는 <表 1>과 같다.

<表 1> 船舶의 特性

특성		TYPE 1	TYPE 2	TYPE 3
수로내 속력	m/min	216.1	246.9	308.7
	Knots	7.0	8.0	10.0
길이	meter	297.0	263.0	213.0
선박비용	\$/min	21.0	14.0	10.0
	\$/day	30,240	20,160	14,400



<그림 4> 水路能力算定 模擬實驗 模型의 흐름圖

水路의 길이는 5海里이고 앞에서 언급한 假定을 전부 만족한다. 船隊의 構成의 각 종류의 船舶이 같은 비율로 倒着하는 것으로 하고 5개의 單位時間當 倒着船舶 數에 대하여 계산했다. 先入先出原則의 경우 最大 單位時間當 倒着船舶數는 3.83척/시간이다. 模擬實驗 模型은 分단위로 계산하여서 先入先出原則의 경우의 모의실험 수행시간(Simulation Run Time)은 720,000분으로 하였고, 다른 경우에는 432,000분으로 하였다. 초기조건 준비 기간(Warming-up Period)은 144,000분으로 하였다. 平均待機時間은 水路能力 算定模型에서 가장 중요한 結果로 <表 2>에 나타나 있다.

<表 2> 平均待機時間

(單位: 分)

척/시간	FCFS	FAST	COST
3.80	780.0	178.0	220.0
3.78	526.0	161.0	203.0
3.45	70.9	58.3	72.9
2.88	24.8	22.7	26.0
1.92	8.4	8.7	8.6

<表 2>에서 보는 바와 같이 高速船 優先原則(FAST)을 채택함으로써 바쁜 水路의 경우 先入先出原則의 경우보다 平均待機時間을 현저히 줄였음을 알 수 있다. 高速船 優先原則의 경우도 앞서 豫測한 대로 바쁜 水路의 경우에는 平均待機時間이 줄어들음을 알 수 있다. 先入先出原則의 경우 앞에서 유도한 공식과 模擬實驗 模型 結果와의 一致度는 88.2~99.9%의 높은 一致率을 보였다.<表 3 參照>

<表 3> 模擬實驗 模型 結果와 公式과의 一致度

척/시간	평균대기시간(분)		
	모의실험 결과	공식결과	일치도(%)
3.80	780.0	834.337	93.5
3.78	526.0	596.171	88.2
3.45	70.0	75.762	93.6
2.88	24.8	25.232	98.3
1.92	8.4	8.409	99.9

<表 4>는 선박종류별 平均待機時間을 보여 준다.

<表 4> 船舶種類別 平均待機時間

(單位: 分)

척/시간	Type	FCFS	FAST	COST
3.78	#1	524.0	412.0	25.4
	#2	527.0	38.6	51.3
	#3	527.0	26.8	533.0
1.92	#1	7.7	9.5	6.6
	#2	7.8	7.8	7.7
	#3	9.6	8.9	11.6

先入先出의 경우는 당연히 船舶 種類別 비슷한 平均待機 時間이 관측되었다. 그러나 高速船 優先 및 高價船 優先의 경우 優先原則 때문에 낮은 優先度를 가진 船舶 種類는 상당히 긴 평균시간이 예상되나 그 긴 平均待機 時間도 先入先出原則의 경우보다도 비슷하거나 짧아졌음을 알 수 있다. 그러나 한가한 水路의 경우는 優先原則 適用의 頻도가 낮아서 큰차이를 보이지 않는다. 이 船舶 種類別 平均待機時間을 이용해서 平均船舶 待機 費用을 구할 수 있다. (表 5 參照)

<表 5> 平均待機 費用

(單位: 달러)

척/시간	FCFS	FAST	COST
3.80	11,700	3,550	2,370
3.78	7,890	3,190	2,190
3.45	1,060	1,080	856
2.88	370	378	342
1.92	123	132	121

예상대로 高價船 優先原則下의 水路運用이 평균 대기비용이 가장 적음을 알 수 있다. 이제 船隊構成比率과 水路運用原則下의 관계를 살펴 보기로 하자.

<表 6>은 세가지 다른 船隊構成 (FM118은 Type 1의 선박이 10%, Type 2의 선박이 10%, Type 3의 선박이 80%인 경우임)에 대한

〈表 6〉 다른 船隊構成에서의 平均待機費用

FM	% λmax	FCFS	FAST	COST
118	98.6	8,130	1,890	4,240
333	98.6	7,350	3,420	2,420
811	98.6	10,200	9,310	3,280

여 平均待機 費用을 보여주고 있다. 船隊構成이 다른 경우 최대단위시간당 倒着隻數가 다르므로 倒着隻數가 각각의 경우 그 최대값의 98.6%인 바쁜 水路의 경우를 비교해 보았다. 〈表 6〉에서 보는 바와 같이 FM118의 경우에는 가장 經濟的인 水路運用原則은 高速船 優先原則의 水路運用이나 다른 두 경우에는 高價船 優先原則의 水路運用임을 알 수 있다. 이는 주어진 條件에 따라서 최적 運用원칙이 달라짐을 보여주고 있다.

VI. 結 論

航海水路의 能力은 單位時間當 倒着 船舶數 및 水路의 混雜度, 즉 平均待機時間으로 표현될 수 있다. 같은 物理的 條件의 水路라 하더라도 水路의 運用原則에 따라 그 能力은 변할 수 있다. 또한 주어진 중요한 조건이 바뀌면 最適水路運用原則도 변할 수 있다. 이 중요한 조건이란 船隊의 構成比率, 單位時間當 船舶 倒着數, 水路內에서의 航海速度 등이다. 先入先出原則下의 平均待機時間은 待機理論을 應用하여 구할 수 있으나, 優先原則(Priority Queue Discipline)이 적용될 시에는 模擬實驗 模型(Simulation Model)만이 유일한 解決策이다. 일반적으로 平均待機時間의 측면에서는 高速船 優先 運用原則이 最適運用原則이며, 平均待機費用面에서는 高價船 優先運用原則이 最適運用原則이다. 그러나 실제 이 원칙들의 적용시 施行上의 複雜性이나 상대적으로 損害를 보는 선박 運用자들의 반발도 하나의 費用으로 계산되어야 할 것이다. 문제 자체의 지역성 및 특성으로 어떠한 水路運用原則이 最適이라고 일반적으로는 結論 지을

수 없다. 어떤 航海水路의 能力을 分析하려면 그 水路의 주어진 條件에 맞는 模型을 開發하여 여러가지 경우를 검토하여야만 한다.

本 論文은 합리적이고 논리적인 航海水路 能力 算定方法을 제시하였고, 船主들의 제일 큰 관심사의 하나인 水路에서의 船舶待機時間의 算定方法을 유도하였다. 또한 새로운 航海水路 運用方法(高速船優先 및 高價船優先 運營原則)을 제시하고 그 새로운 運用方法의 導入이 전체 航海水路能力에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 本 論文에서 개발된 模擬實驗 模型(Simulation Model)은 실제 水路能力 算定에 직접적으로 적용될 수 있으며 模型의 柔軟性(flexibility)은 해석적인 방법으로는 해결이 불가능한 변화하는 水路 주위 환경의 분석을 가능케 하였다. 本 論文은 適正 港灣 計劃의 수립의 중요한 道具(tool)를 제시하는데 그 의의가 있다.

參 考 文 獻

- [1] Carl H. Plumlee. Optimum size seaport. Journal of the Waterways and Harbour Division, ASCE, 92(WW3), Aug. 1966.
- [2] Thomas J. Frata, Alvin S. Goodman, and Austin E. Brant. Prediction of maximum practical berth occupying. Transaction, ASCE, Part 126, 1987.
- [3] F. Parthiot and J. Sommet, Stopping supertankers in a canal. In Symposium of Navigability of Constrained Waterways, including Harbour Entrance, Vol. 3, Delft, 1978.
- [4] PIANC, International oil tanker commission: working group No. 2 report. PIANC Bulletin, 16, 1973.
- [5] Richard C. Larson and Amedeo R. Odoni. Urban Operations Research. Prantice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1982.

- [6] Leonard Kleinrock. Queueing System, Volume I: Theory, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1975.
- [7] J. D. C Little. A proof of the queueing formula $1=W$. operations research, 9, 1961.
- [8] E. E. Bottoms, Principal tonnage capacity of canalized waterways. Journal of the Waterways and Harbour Division, ASCE, Feb. 1966.