

〈論文〉

港口에 있어서 閘渠(門)의 適正規模決定을 爲한 待機行列의 模擬操作에 關한 研究

A Study on Queuing Simulation for Determination
of Optimum Lock Size

金 岫 根

Kim, Suen Guen

金 治 弘*

Kim, Chi Hong

ABSTRACT

In general, the lock structure is built at place of having great deal range for dealing with effective ships operation such as in the west coast of Korea.

In Incheon harbour, the two locks of 10 KT and 50 KT tonnage class in total has been constructed for several years ago, however, it has been recorded many waiting vessels at outer harbour due to the increment of oceangoing vessels & shortage of berthing facilities in accordance with beyond expectation of cargo amount increment.

This paper attempts to solves the waiting vessels problem at outer harbour by simulation in applying queuing theory.

It is found that the simulation results such as average queue time, service time, and queue length during lock operation can be applied to find the minimum of the cost function for determination of optimum Lock Size

1 머리말

仁川港과 같이 干滿의 差가 甚한 港口에 있어서는 荷役作業과 操船의 能率과 便宜를 爲하여 閘渠式港口가 構築되어 우리나라 二大港의 하나로서 그存在가 크게 評價되고 서울의 閘門으로서 荷役量의 增加와 더불어 50KT級의 第二閘渠까지 竣工運營하게 된지 오래되었다. 그러나 近代의 高度經濟成長과 더불어 그規模의 適正線을 再檢討하여야 할 時期가 到來한것 같다. 이러한 現象은 비단 仁川港뿐 아니라 干滿의 差가 甚한 西海岸의 臨海工業團地가 開發됨에 따라(現在 計劃中인 牙山閘渠滿과 같이) 반드시 閘渠式港口의 建設이 必要하게 될때가 올것이다.

港口에 閘渠를 設置하므로써 港의 内外水位差 및 潮流의 影響을 減少시키고 港內荷役等 港灣機能의 向上 및 船舶運航의 安全性을 向上시키는 것이 可能하게 된다. 한편 閘渠는 輸送活動系統의 隘路가 되는 可能性

도 있고 그 結果 輸送經濟에 미치는 影響은 大端히 크다고 할 수 있다. 따라서 港口의 閘門을 가지는 閉口港의 計劃에 있어서 輸送經濟의 由로 보아 閘門의 適正規模를 決定하기 爲한 研究은 今後 大端히 重要하게 되리라고 믿는다.

本 論文에서는 그 適正規模決定에 있어서 前題가 되는 閘門에 輻輳되는 船舶의 待機行列의 模擬操作(Simulation)을 檢討한 內容 및 그 結課에 對하여 記述하고 저 한다.

2 適正規模決定의 評價方法

閘渠計劃은 港灣施設計劃의 一環인 以上 그 計劃策定에 있어서 다른 港灣計劃과 마찬가지로 國民經濟立場에의 評價하여야 할 것이다.

一般港灣에 있어서의 計劃은 港灣施設의 不備 施設 狹少로서 오는 擴張, 港灣機能向上을 圖謀하기 爲하여 이루어 지는데 反하여, 閉口港인 경우는 自然的制約條件으로서는 港灣機能低下를 閘門建設에 依해서 解決코자 하는 計劃이다. 우리나라 西海岸인 경우 閘渠設置를 爲

* 技術士 三換엔지니어링 常務理事

** 技術士 成均館大學校 理工大學副校授

지 않고는 大規模의 港灣荷役, 大型船舶運航이 不可能하므로 8.15 解放前에 仁川港에 5KT 級閘渠(現在는 內港擴張으로 撤去되었음)가, 그리고 1974 年 5 月에 完工된 50KT 級 1 基와 10KT 1 基가 建設된 것이다.

閘渠建設에 따르는 效果를 列挙해보면 다음과 같다.

(1) 待潮時間이 大幅으로 減少하고 輸送時間을 節約 할 수가 있다.

(2) 그結果 入港船舶의 入港可能時間帶가 增大하고 入港船의 集中이 적어지고 船舶航行의 安全性이 커진다.

(3) 港內에서의 潮流의 不規則 흐름이 減少하고 泊地面積의 增大, 碇泊船舶의 安全性 및 荷役能力의 向上이 期待된다.

(4) 航路의 増深, 幅幅이 容易하며 港灣의 管理, 運營費用이 減少한다.

(5) 埋立造成이 可能하게 되고 그것에 依해 既存都市의 再開墾이 容易하게 또 效果으로 擴張 할 수 있게 한다.

(6) 潮位差가 減少하므로서 干潮時에 있어서도 基準水面을 維持 할 수 있어 그結果 航路든가 泊地 나아가서 岸壁 등의 實質的인 水深增大를 시킨다.

(7) 高潮에 對한 災害로부터 港灣의 背後地를 防護하고 背後地의 工業立地條件을 向上시킨다.

그러나 反面에 閘渠建設로 因하여 憂慮되는 點도 있다. 即

(1) 閘門을 利用하기 爲한 待機現象이 일어나고 船舶의 待機損失이 생긴다.

(2) 閉口港으로 하므로서 港內의 海水 흐름이 阻害되므로서 港內汚染 등의 公害가 생긴다.

(3) 閘門開閉에 隨伴하여 港內의 注水問題가 考慮되어야 한다.

本 研究와 關聯하는 評價基準은 前迷한 閉口港의 長短點을 一一히 網羅하여 考察함을 止揚하고 輸送經濟에 對한 閘門設置의 直接效果만을 생각하기로 하고 費用函數의 最小를 目標로 하였다.

即 C_A : 船舶關係의 單位時間當의 費用(元/日)

$C_B(S)$ 閘門最大收容隻數를 S 隻으로 한 경우의 施設關係의 單位時間當의 費用(元/日)

라 하면

$$C_i = C_{Ai} + C_{Bi}$$

$$= B\lambda \left\{ (tw(s) + \frac{k}{\mu}) T + (t\bar{w}'(s) + \frac{1}{\mu'}) (1-T) \right\} + C_B(s) \dots\dots\dots (1)$$

가 된다. 여기서

B : 1 隻의 單位時間當의 船舶關係의 費用(元/日 · 隻)

$t\bar{w}(s)$: 最大收容隻數를 S 로 했을때의 閘門操作時의 船舶의 平均待機時間/日

k/μ : 閘門의 平均셔어비스時間/日

$t\bar{w}'(s)$: 閘門開放時의 船舶의 平均待機時間/日

$\frac{1}{\mu'}$: 閘門開放時의 閘門의 셔비스時間/日

T : 1 日의 平均閘門操作時間比率

i : 入港對象船舶과 閘門組合時의 番號

따라서 주어진 i 에 對한 S 를 獨立變數로 하여 式(1)을 最小로 하는 閘門의 收容隻數 S_i^* 라고 하면 最適閘門規模는

$$C^* = \min_{(i)} \{ C_i(S_i^*) \} \dots\dots\dots (2)$$

를 滿足하는 S_i^* 로서 決定되는 閘門規模로 하면된다. (要參照 R-43 ~ 47)

本 研究에서는 (1)의 費用函數中에서 $tw(s)$ 및 k/μ 을 對象閉口港에서 模擬操作手法를 써서 求하고자 하는데 있으므로 이에 對하여 詳細히 記述하고자 한다.

3 閘門에서 船舶幅轉現象의 解析

(1) 閘門操作의 概要

船舶의 閘門에서의 待機現象은 다음과 같은 모델에 依해 表現 할 수 있다. 入出港船舶은 外潮位差때문에 閘門에 있어 水位調節을 받아야 한다. 通關船舶數가 적을때에는 하나의 閘門을 利用하여 船舶의 出入港의 兩쪽을 向할 수가 있으나 多數船舶의 通關인 경우에는 閘門에서의 船舶의 幅轉을 緩和하기 爲해 또 船舶의 通關安全性을 確保키 爲해 複數個의 閘門을 建設하여 各 各 閘門을 入港用과 出港用으로 쓰이는것이 좋을 것이다.

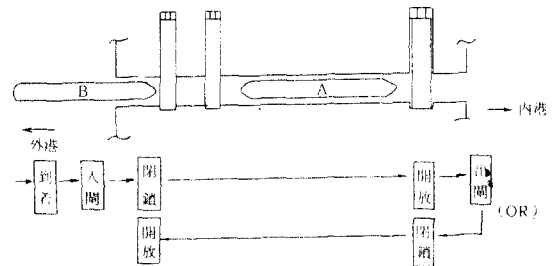


그림-1 閘門開閉操作圖

그림-1에서 入閘扉前面에 到着한 船舶은 入閘扉가 閉鎖되어 있을때에는 入閘扉앞에서 待機行列을 만든다. 入閘扉가 開放되면 待機行列의 先頭로부터 入閘可能 最大隻數(S 隻) 待機行列이 最大隻數에 比치지 않을때에는 全隻數가 한꺼번에 入閘한다. 다음에 入閘扉를 閉鎖하고 內外的 水位調節을 行하고 出閘扉를 開放하고

入閘船舶이 出閘한다. 다음에 出閘扉를 閉鎖하고 入閘扉를 開放하여 一閘門操作을 完了한다. 이操作이 閘渠에서 反復한다.

한편 内外潮位差 流速이 작을때에는 閘門의 入出閘扉는 함께 開放되어 있고 入出港船舶은 閘室內을 通過할 따름이다.

(2) 入出港船舶의 到差分布

入出港船舶의 到着分布는 一般으로 포아손(Poisson) 分布를 한다고하는데 水級 研究對象으로한 仁川港口인 경우 1977 및 1978 年의 到着隻數統計(표-1)에 依해 調査한바에 依하면 그림-2.1 및 2.2 와 같이 Poisson 分布를 形成함을 立証하고 있다. 그 結果는

10 KT級 閘渠에서

$$1977 \text{ 年은 } P(x) = \frac{e^{-1.64} \cdot 1.64^x}{x!}$$

$$1978 \text{ 年은 } P(x) = \frac{e^{-2.3} \cdot 2.3^x}{x!}$$

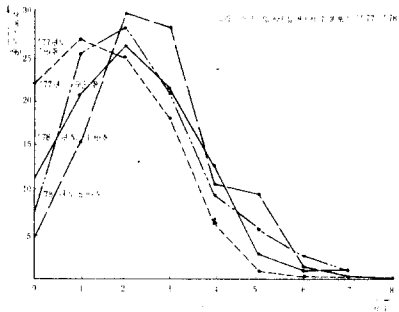


그림 - 2.1 입항 (입거) 척수분포도 ('77 - '78)

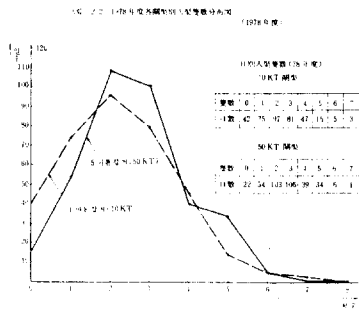


그림 - 2.2 1978 年度 各급거별 입거집수분포도

表 - 1 仁川港의 閘渠通過実績(入港基準)
(1974 ~ 1978 年間)

年度別	閘渠別	5 分 時 間 階 級				計	年間通過 總入船隻(G/T)
		1 分 以 下	1 分 以 上 2 分 以 下	2 分 以 上 3 分 以 下	3 分 以 上		
1974 (5-12)	194	270	84	354	548	20,760	
1975	325	377	158	575	870	28,486	
1976	393	347	219	565	1,158	35,768	
1977	423	239	404	433	1,436	38,325	
1978	824	444	541	965	1,809	39,858	
計	2,549	1,867	1,435	2,272	5,821		

50 KT級 閘渠에서

$$1977 \text{ 年은 } P(x) = \frac{e^{-2.31} \cdot 2.31^x}{x!}$$

$$1978 \text{ 年은 } P(x) = \frac{e^{-2.6} \cdot 2.6^x}{x!}$$

(3) 閘門의 서비스時間分布의 檢討

閘門의 서비스時間은 一般으로 어랑(Erlang) 分布를 한다고 되어 있어 이를 確認하기爲하여 實測資料로 檢討하였다. 어랑分布라 함은 T_1, T_2, \dots, T_k 가 서로 獨立하여 함께 平均値 $K\lambda$ 의 指數分布에 따를때에는 $\int = \sum_{i=1}^k T_i$ 의 分布의 密度函數는

$$f(t) = \frac{(\lambda k)^k t^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\lambda kt} \quad (t > 0) \quad (3)$$

로 表示되며 이 分布를 位相K의 어랑分布라 한다. 이 分布의 平均値 $E(S_k)$ 및 分散 $V(S_k)$ 는 各各 다음과

$$E(S_k) = 1/\lambda, \quad V(S_k) = \frac{1}{k\lambda^2}$$

이 어랑分布는 K值에 따라서 여러가지로 달라지고 K=1 일때 冑식은 指數分布 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$ 가 된다. K의 값을 증가시키면 平均値는 不變하나 分散은 漸次로 減少하여 $K \rightarrow \infty$ 의 極限에서는 分散 零의 單位分布가 된다.

1) 50 KT 閘渠

1978 年度 1 個年間に 걸친 入渠總隻數 955 隻의 隻當 平均서비스時間은 閘渠通過時間統計에 依하면 49 分 25 秒였으며 이것을 標準時間(閘門管理事務所査定)으로 50 分으로 하였다. 이 50 分을 單位時間으로 하고 單位時間의 1/10 인 5 分을 時間間隔으로 어랑分布의 適合度를 檢定한 結果 表-2와 같이 $K=13$ 에서 어랑分布가 成立하였다.

2) 10 KT 閘渠

이것도 1978 年 實績에 依해 서비스時間 50 分을 單位時間으로 하고 單位時間의 1/10 인 5 分時間間隔으로 그 適合度를 檢定한 結果 表-3과 같이 $K=15$ 에서 어랑分布가 成立한다(要參照 R-4&5, R-46)

(4) 現象의 模型化

本 研究에서는 10KT 閘渠 1 基, 50KT 閘渠 1 基를 對象으로 하여 模擬操作을 突施하였는데 다음과 같은 假定으로 突施하였다.

(1) 船舶은 閘門에 平均値 λ 의 포아손分布로 到着한다.

(2) 到着한 船舶은 先着順으로 閘門의 前面에서 一例로 待機行列을 構成한다.

(3) 서비스時間은 서비스開始時間間隔으로 하고 그 分布는 平均値 $1/\mu$ 의 指數分布로 假定한다. 即 서비스

表-2 어랑分布와 對比한 1978 年度 50KT 開渠 SERVICETIME(μ=50分)

時間區分	單位時間區分	頻度	累積分布(%)	K=15인 어랑分布(%)	備 考
0-5	0-10	0	100.00	100.00	카이-스퀘어법
5-10	10-20	0	100.00	100.00	χ² = 982.118 - 965 = 17.118
10-15	20-30	2	99.90	99.90	χ²(φ=15, α=0.05) = 23.11
15-20	30-40	3	99.06	99.04	e^{χ²(φ=15, α=0.05)} > χ² O.K.
20-25	40-50	34	95.50	94.53	
25-30	50-60	88	86.28	84.75	
30-35	60-70	134	72.25	70.35	
35-40	70-80	164	55.08	52.68	
40-45	80-90	158	37.49	35.96	
45-50	90-100	137	23.14	22.50	
50-55	100-110	80	13.82	13.04	
55-60	110-120	59	7.84	7.15	
60-65	120-130	29	4.61	3.79	
65-70	130-140	19	2.62	1.79	
70-75	140-150	11	1.47	1.05	
75-80	150-160	7	0.84	0.63	
80-85	160-170	3	0.52	0.42	
85-90	170-180	2	0.51	0.32	
90-95	180-190	1	0.21	0.21	
95-100	190-200	1	0.10	0.11	
100以上	200以上	1	0.00	0.00	

表-3 어랑分布와 對比한 1978 年度 10KT 開渠 SERVICE時間(μ=40分)

時間區分	單位時間區分(hr)	頻度	累積分布(%)	K=15인 어랑分布(%)	備 考
0-5	0-10	0	100	100	카이-스퀘어법
5-10	10-20	0	100	100	χ² = 846 - 823 = 23
10-15	20-30	5	100	100	χ²(φ=14, α=0.05) = 23.7
15-20	30-40	25	99.4	99.5	e^{χ²(φ=14, α=0.05)} > χ² O.K.
20-25	40-50	70	96.4	95.7	
25-30	50-60	181	74.4	83.6	
30-35	60-70	192	51	62.3	
35-40	70-80	151	32.7	39.1	
40-45	80-90	106	19.8	21	
45-50	90-100	49	13.9	9.6	
50-55	100-110	22	11.2	3.9	
55-60	110-120	14	9.5	1.5	
60-65	120-130	11	8.1	0.5	
65-70	130-140	4	7.7	0.1	
70-75	140-150	0	7.2	0	
75以上	150以上	0	7.2	0	

스 시간은 上述한 바와 같이 K=13~15의 어랑 분포에 따르고 있으나 解析을 쉽게 하기 爲해 安全側으로 算定한다고 하여 여기서는 指數分布으로 한다.

4 待機理論(Queuing Theory)에 依한 平均待機時間의 算出模型

待機問題에서는 다음과 같은 假定을 두고 解析을 進行키로 한다(要參照 R-47)

지금 微小時間間隔(t, t+Δt)에 1隻의 船舶이 到着하는 確率は λ · Δt + O(Δt) 이고 이사이에 2隻以上의 船舶이 到着하는 確率は O · Δt라고 한다. 여기서 O(Δt)는 O · Δt/Δt → O(Δt → 0)인 項을 表示한다.

只今 시스템內에 n隻의 船舶이 있는 事象을 E_n 이라고 하고, 時刻 t에 E_n인 確率을 P_n(t)라고 하면

時刻 t+Δt에 E_n인 確率は 下記 2個 確率의 合으로 주어진다.

1) 時刻 t에서 E_{n-1} 이고 (t, t+Δt) 사이에 1隻이 시스템內 들어오는 確率

2) 時間 t에서 E_n 이고 (t, t+Δt)에 1隻의 到着도 없는 確率

以上の 結果로서

$$P_n(t + \Delta t) = \lambda \cdot \Delta t P_{n-1}(t) + (1 - \lambda \Delta t) P_n(t) \quad (4)$$

인 方程式이 얻어진다. 또 時刻 t에서 E₀ 이고, t+Δt에서도 E₀인 確率は (t, t+Δt)에도 1隻의 到着도 없는 경우이므로

$$P_0(t + \Delta t) = (1 - \lambda \Delta t) P_0(t) \quad (5)$$

라고 생각해도 좋다. 式(4)와 (5)로부터

$$\frac{P_n(t + \Delta t) - P_n(t)}{\Delta t} = \lambda \{ P_{n-1}(t) - P_n(t) \}$$

$$\frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t} = -\lambda P_0(t) \quad (6)$$

가 求해지고 式(6)에서 Δt → 0라고 하면 差分微分方程式

$$\frac{dP(t)/dt = \lambda \{ P_{n-1}(t) - P_n(t) \}}{dP_0(t)/dt = -\lambda P_0(t)} \quad (7)$$

가 얻어진다.

式(7)의 兩邊을 라플라스(Laplace)變換을 하면

$$P_n^*(s) = L P_n(t) = \int_0^\infty e^{-st} P_n(t) dt$$

라고 놓으면

$$\left. \begin{aligned} P_n^*(s) &= \frac{\lambda}{\lambda + s} P_{n-1}^*(s) \\ P_0^*(s) &= s / (\lambda + s) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

이 된다. 式(8)을 反復關係에 依해서

$$P_0^*(s) = s / (\lambda + s), \quad P_1^*(s) = \lambda s / (\lambda + s)^2, \dots$$

$$P_n^*(s) = \lambda^n s / (\lambda + s)^{n+1}$$

가 되고 結局

$$P_n(t) = L^{-1} P_n^*(s) = \lambda^n L^{-1} \frac{s}{(\lambda + s)^{n+1}}$$

$$= \frac{(\lambda t)^n e^{-\lambda t}}{n!}$$

가 된다. 따라서 時刻 t에서 시스템內에 n隻의 船舶이 들어오는 確率は 포아송分布가 됨을 알 수 있다.

다음에 時刻 t에서의 到着수가 포아송分布일때 n番號의 船舶到着時刻를 t_n 이라 하고 到着間隔時間

$$T_n = t_{n-1} - t_n \quad (n = 1, 2, \dots)$$

의 分布를 求해보자. 이 密度函數를 f(t)라 하면 確率

$f(t) \cdot dt$ 는 어떤時点에서 1隻의 到着이 있고 다음의 t 時間에 到着없고 그後의 dt 時間에 1隻의 確率을 갖는 確率과 같다. 그런데 t 時間사이에 到着이 없는 確率은

$$P_0(t) = (\lambda t)^0 e^{-\lambda t} / 0! = e^{-\lambda t}$$

이고 $(t, t+dt)$ 內에 1隻이 到着하는 確率은 λdt 이므로 $f(t) dt = P_0(t) \lambda dt = \lambda e^{-\lambda t} dt$ 가 된다. 따라서 到着時間은 平均 $1/\lambda$ 의 指數分布

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (t > 0)$$

에 따른다는것이 結論으로 歸結된다. 또한 到着間隔時間 T 의 分散은 $1/\lambda^2$ 로 주어진다.

한편 서비스時間分布가 指數分布

$$g(t) = \mu e^{-\mu t}$$

로 表示된다고 하면 到着인 경우와 마찬가지로 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻이 서비스를 받는 確率은 $\mu dt + O(dt)$ 가 된다. 指數分布에는 지금까지의 狀態와는 無關係로 未來를 決定하는 性質이 있기때문에 지금까지의 時間經過와 $(t, t+dt)$ 사이에 서비스를 完了하는 確率은 一定이라고 해도 좋다.

그것은 下記의 推論으로부터 理解 할 수 있을것이다.

서비스時間 X 가 t 보다도 크다는 條件下에서 $X \leq t+x$ 가 되는 確率은

$$\begin{aligned} P(X \leq t+x | X > t) &= \frac{P(t < X \leq t+x)}{P(X > t)} \\ &= \frac{G(t+x) - G(t)}{1 - G(t)} \\ &= \frac{(1 - e^{-\mu(t+x)}) - (1 - e^{-\mu t})}{e^{-\mu t}} \\ &= G(x) \end{aligned}$$

로 주어지기 때문이다. 여기서 $G(t)$ 는 $g(t)$ 의 分布 函數 $1 - e^{-\mu t}$ 를 表示한다.

Kendall 記号에 依하면 포아송到着, 指數 서비스로 서비스-스테이션이 하나인 경우 $M/M/1$ 라고 쓴다. 閘門은 2개이지만 10,000 DT 1개와 50,000 DT의 것 1개로 各各 分割해서 考察하게 되므로 結局 $M/M/1$ 의 것을 두번 考慮하면 된다.

Queue規律은 先着先順으로 行列길이에 對한 制約은 없는것으로 한다. 이때 時刻 $t+dt$ 에서 E_n 이 되는 確率 $P_n(t+dt)$ 는 다음 4個의 排反事象의 確率의 합이된다.

(1) 時刻 t 에서 E_{n-1} 이 되고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻이 到着하여 서비스를 完了하고 시스템을 떠나는 船舶은 없다.

(2) 時刻 t 에서 E_n 이고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻도 到着치 않고 1隻도 시스템을 떠나지 않는다.

(3) 時刻 t 에서 E_n 이고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻이 도착하고 1척이 시스템을 떠난다.

(4) 時刻 t 에서 E_{n+1} 이고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻도 到着치 않고 1隻이 시스템을 떠난다.

이들의 事象에 對應하는 dt 時間內的 確率은 各各

$$(1) \lambda \Delta t (1 - \mu \Delta t) = \lambda \Delta t + O(\Delta t)$$

$$(2) (1 - \mu \Delta t)(1 - \lambda \Delta t)$$

$$= 1 - \mu \Delta t - \lambda \Delta t + O(\Delta t)$$

$$(3) \mu \Delta t \cdot \lambda \Delta t = O(\Delta t)$$

$$(4) (1 - \lambda \Delta t) \mu \Delta t = \mu \Delta t + O(\Delta t)$$

로 表示된다.

또 $t+dt$ 에서 E_n 인 確率은 다음의 2個의 排反事象의 합이다.

(1) 時刻 t 에서 E_n 이고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻도 到着치 않는다.

(2) 時刻 t 에서 E_n 이고 $(t, t+dt)$ 사이에 1隻도 到着치 않고 1隻이 시스템을 떠난다.

이 dt 時間內的 確率은 各各

$$(1) 1 - \lambda dt$$

$$(2) \mu dt (1 - \lambda dt) = \mu dt + O(dt)$$

로 表示된다. 以上の 諸事象으로부터 다음의 關係式이 얻어진다.

$$\left. \begin{aligned} P_0(t+\Delta t) &= P_1(t) \cdot \mu \Delta t \\ &\quad + P_0(t)(1 - \lambda \Delta t) \\ P_n(t+\Delta t) &= P_{n-1}(t) \cdot \lambda \Delta t \\ &\quad + P_n(t)(1 - \mu \Delta t - \lambda \Delta t) \\ &\quad + P_{n+1}(t) \mu \cdot \Delta t \end{aligned} \right\} (9)$$

式(9)를 變形하여 $dt \rightarrow 0$ 로 하면 微分差分方程式

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_0(t)}{dt} &= -\lambda P_0(t) + \mu P_1(t) \\ \frac{dP_n(t)}{dt} &= \lambda P_{n-1}(t) - (\lambda + \mu) P_n(t) \\ &\quad + \mu P_{n+1}(t) \end{aligned} \right\} (10)$$

을 얻는다.

式(10)을 그대로 쓴다는것은 比較的 複雜하므로 여기서는 定常狀態의 解를 求하는것으로 한다.

定常狀態에서는

$$P_n = P_n(t), \quad \frac{dP_n(t)}{dt} = 0 \quad (t \rightarrow \infty)$$

가 되고 式(10)은

$$P_1 = (\lambda / \mu) P_0, \lambda P_{n-1} - (\lambda + \mu) P_n + \mu P_{n+1} = 0$$

가 된다. 이것은 n에 관한 差分方程式으로서 $\rho = \lambda / \mu$ 라 하면 이解는 다음과 같이 된다(要参照 R-65)

$$\left. \begin{aligned} P_1 &= \rho P_0 \\ P_2 &= \rho P_1 = \rho^2 P_0 \\ &\vdots \\ P_n &= \rho P_{n-1} = \rho^n P_0 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

여기서 $\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1$ 이 되어야 하므로 式(11)에서

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n P_0 = 1$$

라고 할 수 있다. $\rho < 1$ 이면

$$\rho_0 = 1 - \rho \quad (12)$$

式(12)로부터 待機行列길이가 n以下인 確率은

$$\begin{aligned} P(N \leq n) &= \sum_{i=0}^n P_i = \sum_{i=0}^n (1 - \rho) \rho^i \\ &= (1 - \rho) \frac{1 - \rho^{n+1}}{1 - \rho} = 1 - \rho^{n+1} \end{aligned}$$

또 n보다 긴 確率은

$$P(N > n) = 1 - (1 - \rho^{n+1}) = \rho^{n+1}$$

로 附与된다.

시스템中에서 平均隻數는

$$\begin{aligned} E(N) &= \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = \sum_{n=0}^{\infty} n \rho^n (1 - \rho) \\ &= (1 - \rho) \rho \frac{d}{d\rho} \sum_{n=0}^{\infty} \rho^n \\ &= (1 - \rho) \rho \left[\frac{d}{d\rho} \left(\frac{\rho}{1 - \rho} \right) \right] \\ &= \frac{\rho}{1 - \rho} \quad \text{이고} \end{aligned}$$

行列의 平均길이는

$$\bar{n}_s = s / (1 - \rho)$$

待機行列中의 平均隻數는

$$\begin{aligned} n_q &= \sum_{n=1}^{\infty} (n - 1) P_n \\ &= \sum_{n=1}^{\infty} n P_n - \sum_{n=1}^{\infty} P_n = n_s - 1 + P_0 \\ &= \rho^2 / (1 - \rho) \end{aligned}$$

이다.

그리고 各各의 平均待機時間은

$$\bar{t}_s = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\rho}{1 - \rho} = \frac{1}{\mu(1 - \rho)}$$

$$t_q = \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{\rho^2}{1 - \rho} = \frac{\rho}{\mu(1 - \rho)}$$

서비스·스테이션이 비어있는 確率은

$$P(n = 0) = 1 - \rho \quad \text{이고}$$

작 確率은

$$P(n \geq 1) = \rho \quad \text{가 된다.}$$

5 待機行列의 模擬操作 模型

待機行列의 模擬操作은 在庫시스템, 生産시스템, 交通시스템, 其他 企業 및 社會시스템의 問題等을 解決하는데 많이 쓰이고 있다. 例를 들어 서비스·시스템中 서비스·스테이션을 機械修理工場이라고 보면 Queue는 故障機械가 되고 計算센터인 경우는 利用者의 各job가 그것에 該當한다.

이와같은 問題는 解析的으로 풀리는 경우도 있지만 模擬操作에 依해 實際的인 解를 求할 수 있다.

한편 待機行列의 模擬操作方法으로는 다음의 두가지 基本的인 것이 있다. 即 1) 事象中心模型, 2) 時刻中心模型인 것이다. 이들은 또 模擬操作의 時刻進行方法과 關聯해서 各各

1) 變動時間增加模型, 2) 固定時間增加模型으로 分類되어 있다.

1)의 模型에서는 事象(待機行列에서는 到着)이 일어난 時点에서 거기까지 要한 時間을 加算한 時間을 가지고 進行한다. 2)의 模型에서는 模擬操作 루팅中的의 時計를 單位時間식 進行하여 그時刻과 시스템의 狀態를 체크해 가면서 模擬操作을 實行한다. 따라서 時間은 1)에서는 連續量으로 取扱되어 있는것에 反하여 2)에서는 離散量으로서 取扱한다.

本 模擬操作의 檢討는 一聯의 連續量의 事象을 取扱하느니만큼 1)의 경우에 該當되는 셈이다.

既述한바와 같이 여기서는 單一窗口에서 先着先順인 경우의 模擬操作模型에 對하여 到着間隔時間, 서비스 時間은 亂數에 依해 附与되는것으로서 그들의 分布 f(t), g(t)는 어느分布라도 適用할 수 있게 해 두었다.

이 觀點에 보면 지금 생각코져하는 待機行列理論은 G/G/1인 경우이라고 말할 수 있다. 이것은 또한 複數канал로의 拡張은 直列型, 並列型 어느 模型作成도 可能하게 하였다.

以下 使用하는 主된 記號를 다음과 같이 定한다. 但 $i = 1, 2, \dots, \dots, \text{MU}$ 로 한다.

$AT_i = i$ 番號의 船舶과 $(i + 1)$ 番號의 船舶到着 間隔時間(時間)

$ST_i = i$ 番號의 船舶에 對한 서비스時間(時間)

$WST_i = i$ 番號의 船舶이 시스템內에 滞在하는 時間 ($WT_i + ST_i$) (時間)

$WQ_i = i$ 番號의 船舶이 到着했을 때의 待機行列 길이(隻·時間)

$WS_i = i$ 番號의 船舶이 到着했을 때의 시스템內에 있는 船舶數(隻·時間)

$DT_i = i$ 番號의 船舶이 到着했을 때의 서비스·스태 이손의 遊休時間(時間)

$M =$ 지금까지의 시스템內에 들어온 船舶의 總隻數(隻)

$CLKT =$ 時刻를 模擬操作하는 時計(時刻)

$SAT =$ 到着間隔時間 AT 의 總合(時間)

$LQ =$ 待機行列中の 隻數(隻)

$SWT =$ 待機時間의 總合(時間)

$SDT =$ 遊休時間의 總合(時間)

$AWT =$ 平均待機時間(時間/隻)

지금인 경우 여러가지 狀況下에 시스템 到着을 考察 하고 이것을 基礎로하여 模擬操作模型을 作成한다.

어떤 時刻 T 에서 K 隻의 船舶이 있고 各各의 船舶에 要하는 서비스時間(開門操作, 入船에 要하는 時間)을 第1 船舶에 對하여 S_1 時間, 第2 船舶以下에 對해서는 S_2 時間, \dots, \dots, S_k 時間으로 한다. 第1의 船舶은 이미 서비스中인지도 모르나 그 경우에는 남아돌아가 時間이라고 생각한다. 또 다음 船舶와의 到着間隔時間 AT 에서 서비스時間 ST 를 要하는 새로운 船舶이 到 着하고 시스템의 時刻이 T' , 隻數가 K' , 서비스時間 이 S'_t ($t = 1, \dots, \dots, K$)가 되었다고 하자. 이때 到着 間隔時間 AT 의 길이로 부터 待機行列길이 WQ , 시스템內의 滞在隻數 WS 는 다음과 같이 求해진다.

(O) $AT < S_1$ 인 경우

새로운 船舶이 到着하고, 아무 船舶도 떠나지 않는다

($E_k \rightarrow E_{k+1}$)

$$K' = K + 1$$

$$S'_1 = S_1 - AT, S'_2 = S_2, \dots, S'_k = S_k,$$

$$S'_{k+1} = ST$$

$$WQ = K \cdot AT, WS = WQ + AT$$

(1) $S_1 \leq AT \leq S_1 + S_2$ 인 경우

새로운 船舶이 到着하고 1隻이 떠난다. ($E_k \rightarrow E_k$)

$$K' = K$$

$$S'_1 = S_2 - (AT - S_1), S'_2 = S_3, \dots,$$

$$S'_{k-1} = S_k, S'_k = ST$$

$$WQ = S_1 + (K - 1) \cdot AT, WS = WQ + AT$$

(2) $S_1 + S_2 \leq AT \leq S_1 + S_2 + S_3$ 인 경우

새로운 船舶이 到着하고 2隻이 떠난다. ($E_k \rightarrow E_{k-1}$)

$$K' = K - 1$$

$$S'_1 = S_3 - (AT - S_1 - S_2), S'_2 = S_4, \dots,$$

$$S'_{k-2} = S_k, S'_{k-1} = ST$$

$$WQ = 2S_1 + S_2 + (k - 2) \cdot AT$$

$$WS = WQ + AT$$

以下 똑 같이 생각 할 수 있어 一般으로 다음과 같 이 綜合된다.

$$(K) \sum_{i=1}^J S_i \leq AT < \sum_{i=1}^{J+1} S_i \text{ 인 경우}$$

새로운 船舶이 到着하고 J 隻이 떠난다

($E_k \rightarrow E_{k-J+1}$)

$$K' = K - J + 1$$

$$S'_1 = S_{J+1} - (AT - \sum_{i=1}^J S_i)$$

$$S'_2 = S_{J+2}, \dots, S'_{k-1} = S_k, S'_{k-J+1} = ST$$

$$WQ = \sum_{i=1}^J (J - i + 1) S_i + (K - J) \cdot AT$$

$$WS = WQ + AT$$

$$(\kappa + 1) \sum_{i=1}^{\kappa} S_i + ST \leq AT \text{ 인 경우}$$

새로운 船舶이 到着하고 다음 船舶이 到着할때까지 의 새로운 船舶을 包含한 全船의 서비스가 完了하고 시스템이 空虛가 된다. ($E_k \rightarrow E_0$)

$$K' = 0$$

$$WQ = \sum_{i=1}^{\kappa} (\kappa - i + 1) S_i$$

$$WS = WQ + \sum_{i=1}^{\kappa} S_i + ST$$

以上の 狀態를 固示하면 第3圖와 같다.

即 이 方式으로 模擬操作을 進行하기 爲해서는 우선 到着分布와 서비스分布를 決定하고 그分布에 따르는 亂

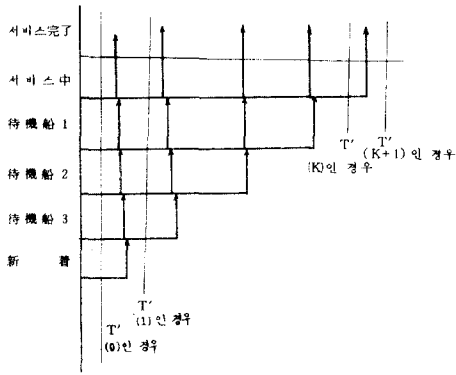


그림 - 2.3 待機狀態圖

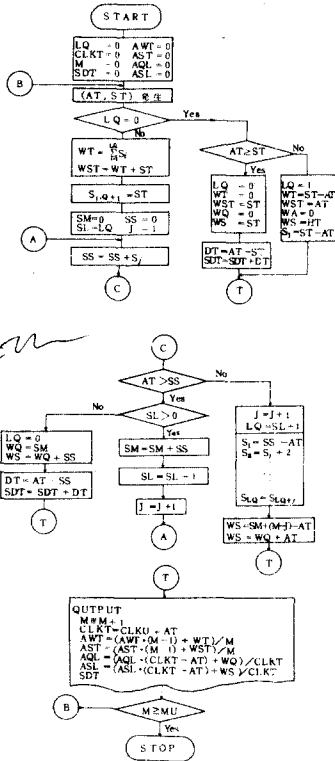


그림 - 2.4 待機行列 Flow-Chart

數 發生 루-틴 (Routine) 에 依해 到着間隔時間 AT와 서비스時間 ST를 決定한다.

다음에 現在の 待機行列길이, 各各의 船舶所要서비스時間과 AT와의 關係로 부터 各特性值를 計算하면 된다.

新船의 待機時間은 그림 4와 같다.

$$WT = \begin{cases} \sum_{k=1}^{K'} S_k (= \sum_{k=1}^K S_k - AT), & (K' \geq 2) \\ 0 & (K' = 0.1) \text{이고} \end{cases}$$

스태이손의 遊休狀態는 $K' = 0$ 인 경우에 일어나고 $DT = AT - ST$ 가 된다.

이와같은 一聯의 計算過程을 要約한 flow-chart는 그림 - 2.4와 같다.

6 模擬操作成果分析

6.1 統計実績의 分析

仁川港開渠의 運用実績統計에 있어서 이研究와 關聯된 것만 圖示하면 그림 - 6.1 ~ 6.5와 같이 入港待機時間分布, 到着時間間隔分布, 接岸時間分布等 各이 다 指數分布를 이루고 있고 그次數가 높거나 낮거나 그差異 異 뿐이다.

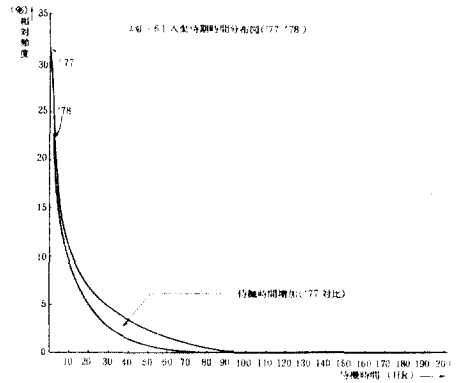


그림 - 6.1 入港대기 시간분포도 ('77 - '78)

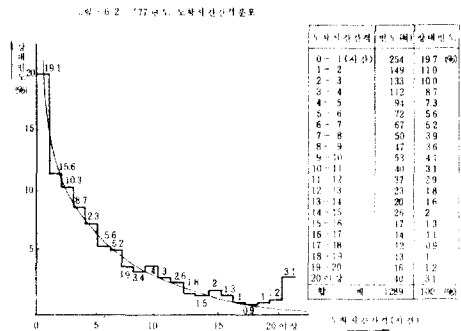


그림 - 6.2 '77년도 도착시간간격분포

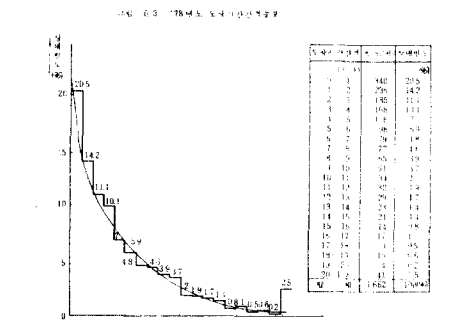


그림 - 6.3 '78년도 도착시간간격분포

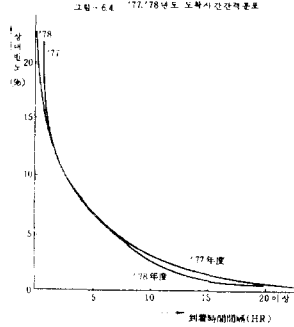


그림 - 6.4 '77, 78년도 도착시간 간격분포

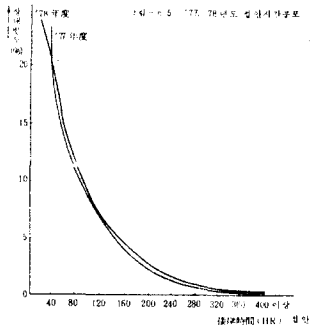


그림 - 6.5 '77, 78년도 접안시간분포

6.2 模擬操作成果分析

(1) 平均待機時間에 關한 模擬操作成果分析

最小費用函數를 求하기 위해 平均待機時間을 求하는 데 있어서 通過隻數 λ를 78年度 実績值를 基本數值로 하여 即 10KT 閘渠인 경우 2.3隻/日(= 0.095隻/HR), 4.0隻/日(= 0.167隻/HR), 6.0隻/日(= 0.250隻/HR), 9.0隻/日(= 0.383隻/HR), 10隻/日(= 0.416隻/HR), 15隻/日(= 0.625隻/HR)로 變化시켜서 시뮬레이션 하였으니 別표-6.1 과 같다.

이것은 다시 通過隻數 "λ" 를 2.3隻/日로 一定하게 하고, 서비스時間 "μ" 를 變化시킬 경우의 平均待機時間을 集計한 것이 표-6.2 와 같다.

表- 6.1 10KT 渠 平均待機時間集計表 (μ=40分=0.667hr)

M(隻數)	CUG(時刻)	AVWAT (平均待機時間)	SDT (總遊休時間)	備考
λ = 2.3 隻/日 (= 0.095 隻/HR)				
900	8,826.4453	0.174	8,114.002	
1,000	9,776.3672	0.173	8,985.141	
1,500	14,559.0195	0.170	13,375.727	
2,000	19,393.3984	0.170	17,816.984	
2,460	23,912.4219	△ 0.167	21,980.430	
3,000	29,080.9844	0.170	26,721.102	
3,570	33,931.0312	0.170	31,178.227	
3,700	36,616.8125	0.168	33,655.641	
3,800	36,847.8281	0.169	33,859.937	

λ = 4.0 隻/日 (= 0.167 隻/HR)			
900	5,708.1152	0.717	4,284.389
1,000	6,322.4395	0.716	4,741.271
1,500	9,415.4336	0.708	7,050.779
2,000	12,541.9180	0.705	9,391.406
2,560	16,097.1875	△ 0.697	12,077.612
3,000	18,807.1875	0.705	14,089.660
3,570	21,943.8906	0.704	16,440.531
3,700	23,680.8672	0.698	17,760.766
3,800	23,830.2500	0.702	17,857.406
λ = 6.0 隻/日 (= 0.250 隻/HR)			
900	3,813.0186	1.191	2,381.290
1,000	4,223.3906	1.191	2,642.213
1,500	6,289.5000	1.184	3,924.820
2,000	8,378.0039	1.182	5,227.488
2,560	10,753.0391	△ 1.169	6,732.834
3,000	12,563.3789	1.183	7,845.859
3,470	14,559.2734	1.170	9,112.312
3,500	14,658.7461	1.182	9,155.410
3,800	15,918.8672	1.180	9,946.199
λ = 9.0 隻/日 (= 0.383 隻/HR)			
900	2,488.9238	3.093	1,065.186
1,000	2,756.7891	3.095	1,175.603
1,500	4,105.4375	3.096	1,740.725
2,000	5,468.6836	3.099	2,318.140
2,560	7,018.8945	△ 3.060	2,998.775
3,000	8,200.5039	3.105	3,483.182
3,370	9,232.8555	3.065	3,943.412
3,500	9,568.1445	3.103	4,066.177
3,800	10,390.6250	3.102	4,418.748
λ = 10 隻/日 (= 0.416 隻/HR)			
900	2,291.4746	3.590	867.746
1,000	2,538.0889	3.593	956.915
1,500	3,779.7402	3.596	1,415.061
2,000	5,044.8437	3.599	1,884.342
2,560	6,462.0898	△ 3.553	2,442.013
3,000	7,549.9727	3.605	3,211.034
3,370	8,500.4258	3.558	3,211.034
3,500	8,809.1133	3.603	3,307.695
3,800	9,566.3008	3.602	3,594.591
λ = 15 隻/日 (= 0.625 隻/HR)			
900	1,525.2026	11.978	103.518
1,000	1,689.3486	11.963	114.168
1,500	2,515.8008	11.886	167.423
2,000	3,351.2051	11.842	220.677
2,560	4,655.7031	△ 11.693	305.884
3,000	5,025.3066	11.788	327.186
3,270	5,483.3047	11.703	359.139
3,500	5,869.4434	11.770	380.441
3,800	6,367.4863	11.763	412.394

表- 6.2 10KT 渠 平均待機時間集計表 (λ=2.3 μ=0.095 隻/HR 一定하게 하고 μ를 變換한 경우)

μ	M	CLRT	AVWAT	SDT	備考
0.333	3,370	41,627.8894	1.658	29,771.141	
0.416	3,470	34,313.0515	1.086	29,579.750	
0.500	3,470	34,313.0516	0.791	31,047.042	
0.583	2,470	27,185.2031	0.629	22,767.109	
0.667	2,460	23,912.4219	△ 0.167	21,980.430	最小의 AVWAT
0.750	3,370	37,223.0516	0.414	32,519.016	
0.833	3,370	37,223.0516	0.349	32,987.281	
0.916	3,570	39,425.1719	0.297	35,343.734	
1.000	3,570	39,425.1719	0.254	35,686.500	

表- 6.3 50KT 閘渠, 模擬操作成果表

(ㄱ) $\mu = 50$ 分/隻 = 0.833 HR/隻로 一定하게 λ 를 달리할때

λ (隻/HR)	M	CLKT	AVWAT	SDT	備 考
0.1083 (2.6 隻/日)	1.450	14,124.0312	0.378	12,361.039	電算處理成果에서 最小隻當平均待機 時間만을 골라서 技 萃 한 것 임
0.167 (4.0 隻/日)	1.550	9,766.8359	0.492	7,816.967	
0.250 (6.0 隻/日)	1.550	6,524.2363	0.712	4,574.363	
0.383 (9.0 隻/日)	1.550	4,258.6602	0.552	2,308.792	
0.416 (10.0 隻/日)	1.550	3,920.8037	1.843	1,970.966	
0.625 (15.0 隻/日)	1.550	2,609.6953	4.884	660.446	

(ㄴ) $\lambda = 2.6$ 隻/日 = 0.1083 隻/HR 를 一定하게 하고 " μ " 를 5 分間隔으로 달리할때

μ (通過時間)	M	CLKT	AVWAT	SDT	備 考
0.500 (30 分) HR	1.650	16,066.7305	0.868	12,609.637	最小 AVWAT
0.583 (35 分)	1.550	15,102.3750	0.664	12,316.344	
0.667 (40 分)	1.650	16,066.7305	0.547	13,475.254	
0.750 (45 分)	1.450	14,124.0312	0.451	12,099.383	
0.833 (50 分)	1.450	14,124.0312	0.378	12,361.039	
0.916 (55 分)	1.450	14,124.0312	0.324	12,361.039	
1.000 (60 分)	1.450	14,124.0312	△ 0.279	12,605.480	
1.083 (65 分)	2.960	28,765.5078	0.244	25,902.172	
1.167 (70 分)	2.460	23,912.4219	0.213	21,705.492	
1.250 (75 分)	2.460	23,912.4219	0.188	22,705.492	
1.333 (80 分)	2.360	14,966.8437	0.505	22,390.445	

表- 6.4 5 万屯級閘渠의 船型別閘渠能力算出表(在來式)

船 型 別					備 考
15,000 噸	20,000 噸	30,000 噸	40,000 噸	50,000 噸	
6414.15(hr)	5205.50(hr)	4017.10(hr)	3,300 (hr)	1,087 (hr)	潮位曲線에 의한 年間可用時間 隻當所要時間(閘渠通過)(入閘+出渠) 夜間忌避時間(hr/年) 안개, 潮流, 風(hr/年) 作業效率 年間實可用時間(hr/年) 年間閘渠通過可能隻數
1.5 hr/隻	1.5 hr/隻	1.5 hr/隻	1.5 hr/隻	1.5 hr/隻	
2,190	2,190	2,190	2,190	0	
171	504	504	504	504	
0.75	0.75	0.75	0.75	0.75	
4.440	3,058	1,870	1,153	437	
1.435	985	610	376	190	

위의 두가지 표 6.1 과 6.2 에서 보다시피 最小費用 函數를 求해 본즉, 平均待機時間이 0.167 일때임을 確 認하게 되었다.

이와같은 模擬操作에서 알다시피 써어비스時間 " μ " 의 값이 적은 경우가 40 分 (= 0.667) 이라는것은 두표 의 結果에서 쉽게 알수 있는 것이다.

따라서, 50KT 閘渠의 경우도 같은 方法으로 시뮬레 이손을 하였다.

10KT 閘渠의 시뮬레이션에서는 두가지 模擬操作의 경우는 꼭같은 結果가 나타났으나, 50KT 閘渠의 경우 는 표- 6.3 에서 보다시피 두가지 模擬操作 方法의 結果가 一致하지 않게 된것은 써어비스時間 " μ " 가 다르기 때 문이다. 實地로 50KT 閘渠의 標準써어비스時間이 50

分이나, 船型和 入渠時의 諸條件에 따라서 60 分에서 80 分사이를 所要케 되는 事例가 있기도하며, 이 경우 의 最小費用函數는 $\mu = 70$ 分/隻 (= 1.167 時/隻) 로 判 明되었다.

위와같은 結果에서 보다시피 이러한 模擬操作에는 다 음과같은 두가지 경우를 필히 操作하여야 한다는것을 알게 되었다.

(1) λ 를 一定하게 하고 μ 를 變化시키는 경우

(2) μ 를 一定하게 하고 λ 를 變化시키는 경우

(-) 模擬操作成果判別

各 閘渠別로 模擬操作한 成果를 一日通過隻數別到達 時間當, 一日通過隻數別給遊休時間當를 作成한것이 그 립- 6.1 ~ 6.4 와 같다.

표- 6.5 現閘渠能力的 綜合的推定(入港基準) 表

1 万吨閘渠: 2.460 隻/年
5 万吨閘渠: 1.450 隻/年

※算出根據

	1 万吨閘渠	5 万吨閘渠	備考
(1) 船型基準:	6.000 DWT	15.000 DWT	
(2) 年間入渠可能時間:	8.140 時間	6.214.15 (潮位曲線) 時間	
(3) 閘渠通過時間:	40 分/隻	50 分/隻	13 時間 1.5 時間
(4) 外港에서 閘渠入口까지의 到達時間:	38 分/隻	40 分/隻	
(5) 出渠所要時間	42 分/隻	48 分/隻	
(6) 夜間入渠忌避時間:	< 2.300 ~ 0.500 時 사이	6 時間/日 = 2.190 時間/年	
(7) 潮流·風·난개:	171 時間/年	171 時間/年	
(8) 作業效率:	0.75	0.75	
(9) 年間可用時間:	6.326 時間	4.400 時間	
(10) 公式:	$\frac{\text{年間入渠能力時間} - \text{諸般要因時間}}{\text{隻當入渠所要時間}} \times \text{作業能率}$		

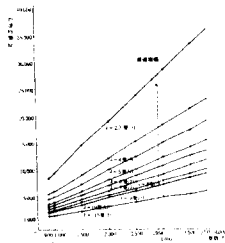


그림 - 6.1 10KT 閘渠 1 日 通過 隻數別 到達時間도 ($\mu = 40 \text{ 分} = 0.667 \text{ hr}$)

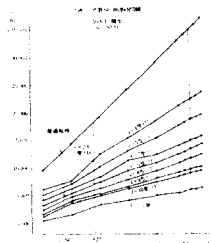


그림 - 6.2 1 日 通過 隻數別 到達時間도 (50KT 閘渠)

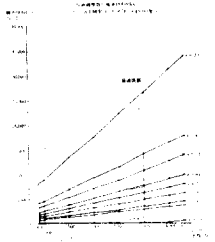


그림 - 6.3 1 日 通過 隻數別 總待機時間圖

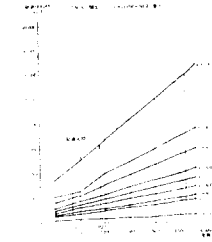


그림 - 6.4 1 日 通過 隻數別 總待機時間圖

(㉔) 閘渠의 最適規模決定

電算에 依해 模擬操作으로 最小平均待機時間과 最適規模(隻數)를 求하게 되었고, 公式(2)의 $C^* = \min \{ C_i (S_i) \}$ 로서 最小費用函數時의 最適規模(隻數)를 求한바 다음과 같다.

10KT 閘渠의 最適規模: 3.770 隻/年

50KT 閘渠의 最適規模: 1.350 隻/年

이中 問題의 焦點이 되는것은 50KT 閘渠이므로 潮位曲線에 依한 在來式閘渠能力算出方法(표- 6.4 要參照)

과 比較하면 거이 맞는다는 것을 알 수가 있었다. 即 電算에서 推定된 最適規模의 隻數은 15,000 屯에서 20,000 屯船型의 거이 中間數值인 1,350 隻임을 알 수가 있다.

只年現在로는 그 船型分布가 15,000 屯級에서 20,000 屯級船型이 約 89 %을 차지하고 있다.

船型基準으로 算出한 閘渠能力의 計算要領은 표- 6.5 와 같다.

7 맺는말

(1) 模擬操作成果와 現實의인 事象分析에서 推定되는 結果와는 恒時 對照檢討가 必要하다고 보아진다.

(2) 模擬操作成果에서 最小平均待機時間을 찾아내는 데는 많은 試算이 必要하게 되므로 " λ " 와 " μ " 의 變化關係와 在檢討되어야 한다.

(3) 指數分布의 確率密度函數計算도 그次數가 15 次까지는 筆算이 可能하였지만 그次數가 37 次 式은 100 次. 事例에 이를 경우에는(要參照 R- 46) 別途의 電算프로그램이 必要하다는 것을 알게 되었다.

◇謝辭◇

本 研究를 위해 研究用役을 주신 海運港灣庁 施設局長 鄭然世氏를 비롯하여 同局企劃課長 李桂完氏, 仁川港建設事務所, 同港閘門管理事務所諸氏, 電算處理에 手苦가 많았던 成均大電算室諸氏에게 眞心으로 感謝를 올립니다(1979 年 5 月 29 日 脱稿)

參考文獻

1. 韓國港灣開發調查報告書(案)(第二卷) - 港灣施設適正規模決定 - 1972.12
2. 항만 적정 규모 결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델 개발연구 보고서 1974.12
3. 항만 적정규모 결정을 위한 컴퓨터 시뮬레이션 모델 개발연구, 建設部, 사례연구 및 부록 1974.12
4. Bertun and Partners, Port Structures a Study National Ports Council London Vol. 1 Main Report 1970 年 2 月 P. P 36 ~ 48
5. Port Structures a Study Bertun and Darters Consulting Engineers, National Port Council, London Vol. 2 Technical Data The West Minister Draning Office LTD. P. P 73~84. 1970
6. Thomas L. Saaty Elements of Queving Theory Mcgrawhill
7. Koeningsberg : E. Finite Queues & Cyclic Queues Operation Research Vol. 8 1960
8. Jahrbuch der Hafenbau Technische - Neunzehnter Band 1941~1949 Trockendock u Seeschleusen

9. 長尾義三 木候昇 岩部玖尚：港口におけるこう門の最適規模決定に関する研究 第22回 年次學術講演會講演概要, 土木學會, 昭和42年(1967)
10. 土木計劃 シンポジウム(I) 日本土木學會土木計劃學研究委員會 昭和47年 1月發行
※ 土木計劃とオペレーションズリサーチ(吉川和廣 pp 19~28) 起終點施設計劃と土木計劃(長尾義三 pp 98~106)
11. 土木計劃學講習會テキスト(4) 土木學會土木計劃學研究委員會 昭和46年 8月發行:
※ 港灣計劃における最適化手法(工藤和男 pp 107~136)
12. サイクルキューモデルによるしゅんせつ船団計劃に関する研究(サービス時間がアーラン分布に従う場合) 日本土木學會誌 第140號(昭和42年4月) by 臨海土木(株) 竹内益雄(京都大學指導)
13. 土木計劃とO. R 吉川和廣著, 丸善出版發行
14. 越 正 : 待ち行列の理論とシミュレーション 第3回土木計劃學講習會テキスト 土木學會, 1970.
15. 森村英典 大前義次: 待ち行列の理論と實際, 日辭技連
16. 本間鶴千代: 待ち行列の理論 理工學社刊
17. 片山猛雄・石渡友夫: 待ち合せ理論の港灣計劃への應用, 北海道開發局, 1962.
18. 交通工學のため推計學 栄二・定井喜明著, 國民科學社 昭和33年刊
19. 久宝・竹澤・天竺, 潮位の類産分布に関する一考察 第23回 土木學會年次講演會講演概要 第II部門 218面
20. 久宝・竹澤・天竺, 潮位のピアンソ工型分布について 第24回(1969年) 土木學會年次講演會講演概要
21. 最新土木計劃—計劃の手順と手法 吉川和廣著, 200面 森北出版刊