선박 스케쥴링의 최적화 분석에 관한 연구

A study on the Optimization Analysis
of
Ship Scheduling

김 시 화

\- Contents -

1. Introduction

세계 상선대에 관한 최근의 자료는 1991년 중반에 전 년도에 대하여 1,240만 총톤의 증가를 기록하였다고 보고하고 있으며, Tab. 1은 이러한 세계의 상선대의 구성을 보여준다. Fig. 1은 Lloyds Shipping Economist지의 자료를 바탕으로 그 이후의 해상 수송수요의 변화 추세를 정리한 것이며, Fig. 2와 Fig. 3은 각각 Dirty tanker 및 Clean tanker의 용선 요율의 변화 추세를 보여준다.

세계의 상선대는 크게 Liner Trade와 Bulk Trade로 구분할 수 있는 해상 무역에 투입되어 수송 서비스를 제공하고 있다. 선박 운항의 기본 유형으로는 흔히 Liner Operation, Tramp Operation, 그리고 Industrial Operation의 세가지로 구분한다. 어느 유형의 선박 운항이든 적절한 선박스케쥴링은 해운의 경영 및 운용에 경제적으로 기여하는 바가 크다.

Table 1. The World Merchant Fleet at Mid 1991
Source: Ronen(1993)

Vessel type	Number	Gross tons (000)	Dead weight (000)
Oil Tankers	6,153	132,438	253,271
Ore and Bulk Carriers	4,843	116,306	206,731
General Cargo	16,206	50,529	75,121
Containers	1,249	25,980	28,638
Ore/Bulk/Oil Carriers	358	19,579	37,298
Liquid Gas Carriers	877	11,466	11,805
Oil/Chemical Tankers	615	6,459	10,946
Chemical Tankers	1,045	3,663	6,286
Others	48,684	69,607	NA
Total	80,030	436,027	NA

*Vessels over 100 gross tons. Compiled from Lloyd's Register(1991)
*NA - data not available

선박 스케쥴링은 해운의 전략적, 전술적 국면 중요한 의사결정 문제이며, 이러한 의사결정의 준거로는 Liner Operators의 경우 일반적으로,

1) 수익의 최대화(Maximize profits per time unit),

2) 선대 활용의 최적화(Optimize the utilization of fleet),

3)최대의 또는 어느 수준의 수용의 유인(To attract maximum or given level of demand) 등을 들 수 있다.

한편으로 Tramp Operators의 경우에는 단위 기간 당의 수익을 최대화 하고자 할 것이며, ndustrial Operators는 자사 화물의 수송 비용을 최소화 하려할 것이다.

적절한 선박 스케쥴링의 경제적인 중요성에도 불구하고 선박 스케쥴링에 관한 연구가 다른 육상의 VRP(Vehicle Routing Problem) 및 VSP(Vehicle Scheduling Problem)에 관한 연구들에 비하여 상대적으로 희소한 까닭으로 문제의 불확실성, 문제 구조의 다변성, 해운 기업의 보수성, 그리고 해운시장의 불안정성, 국제성, 개방성 등에 기인하는 운용적 국면의 의사결정에 대한 상대적 소흘 등을 들수 있다.

본 연구에서는 먼저 2절에서 선박 스케쥴링과 관련된 주요 연구들을 개관하고, 3절에서는 Fisher 등의 살물(Bulk-cargo) 선박의 스케쥴링에 관한 모형을 살펴보고, 이를 Owner's Market의 관점에서 단기간의 선박 스케쥴링이나 비상시의 선박 스케쥴링에 적용할 수 있는 수정된 모형의 유용성을 설명한다. 이어서 모형의 해법에 관하여 살펴본 후 선형 정수계획 모형의 특성상 광범위한 모형에 적용할 수 있는 전산 코드보다는 해당 문제의 모형에 알맞는 전산 코드를 개발하여 이를 사용자에게 친숙한 의사결정 지원 환경으로 구축하는 문제들을 검토하고자 한다.

2. Problem Statement

선박의 스케쥴링과 관련하여 몇몇 용어를 정리하고자 한다. 먼저 방문하여야 할 일련의 항만을 선박에 대하여 배정하는 것을 라우팅(Routing)이라 하며, 선박의 Route 상에서 발생하는 다양한 활동에 대한 시간(time window)을 배정하면 스케쥴링(Scheduling)이 된다. 무역 항로(또는 임무)에 대하여 선대의 선박들을 배정하는 것을 선대전개(Deployment)라 하며, Scheduling과 Deployment가 항상 명확하게 구분되지는 않지만, 후자는 대개 동일 항로상의 연속된 여러 항해를 수행하는 선박들에 대하여 사용되며, 따라서 중.장기 계획과 관련된다.

선박 스케쥴링 문제의 주요 구성 요소에는 화물(Cargoes), 항만(Ports), 선박(Ships), 그리고 비용(Costs) 요소들이 있다. 선박 스케쥴링 문제에 대한 최적화 응용의 가장 고전적인 연구로 Dantzig & Fulkerson(1954)이 발표한 히치코크 수송 모형을 들 수 있으며, Briskin(1966)과 Bellmore(1968)는 이를 일반화한 선형계획 모형으로 정식화하였다. Laderman et al.(1966)은 오대호의 다양한 항만간 화물들을 수송하는 회사가 최소의 선박으로 수송수요를 충족하는 문제를 선형 계획법으로 모형화하였으며, Whiton(1967)은 이 모형에 항만 수용능력 및 화물 취급능력 등에 관한 제약조건을 추가하여 연구하였다.

Appelgren(1969, 1971)은 전형적인 Tramp Operators의 문제를 정수계획 모형을 구하고 Column generationr과 Branch-and-bound 기법으로 이를 해결하였는데, 이 모형이 이후의 연구에 미친 영향을 이해하기 위해 그 논문의 모형 2를 다음과 같이 변형하여 정리 하여 보았다.

Notation $\quad i = 1, \ldots, n$ *ships*, $k = 1, \ldots, l$ *cargoes*,

$j \in N(i)$ *set of feasible sequences for ship* i.

Data

$$a_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if cargo } k \text{ is in the } j\text{th sequence for ship } i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$v_{ij} = \text{value of the } j\text{th sequence for ship } i$$

Decision variables

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if the } j\text{th schedule for ship } i \text{ is selected,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Formulation (0-1 Integer Programming)

$$Max \sum_i \sum_{j \in N(i)} v_{ij} x_{ij}$$

$$s.t. \qquad \sum_{j \in N(i)} x_{ij} = 1 \quad \text{for each ship } i$$

$$\sum_i \sum_{j \in N(i)} a_{ijk} x_{ij} = 1 \quad \text{for each cargo } k$$

$$x_{ij} = \{0, 1\} \quad \text{for each schedule}$$

여기서 중요하게 언급되어야 할 것은 Appelgren(1969, 1971) 이후 Tramp Operators또는 Industrial Operators의 선박 스케쥴링 문제는 선박의 가능한 스케쥴의 생성 문제와 정수계획법으로 모형의 해를 구하는 문제의 두 단계로 나뉘어 해결되고 있다는 점이다. Bellmore, Bennington & Lubore(1971)는 분할 선적을 허용하는 Multivehicle Tanker Scheduling 문제를 혼합 정수계획법으로 정식화 하고 이를 Dantzig-Wolfe decomposition과 Branch-and-bound 기법으로 해결하였으며, Ronen(79)은 단기간의 선박의 라우팅 문제를 다루었다.

McKay & Hartley(1974)는 혼합 정수 계획법에 의한 전산화 된 Tankers의 스케쥴링에 관하여 다룬 것을 시작으로, Miller(1987), Brown et al.(1987), Fisher & Rosenwein(1989), 그리고 Bausch et al.(1991) 등이 Mainframe, VAX, 그리고 마이크로 컴퓨터 등에 접목할 수 있는 대화형 선박스케쥴링 시스템의 구축에 관한 연구가 이루어지고 있다.

그리고 비교적 최근에는 Liner Operators에 대한 선대 규모결정 및 선대전개(Fleet size, mix & deployment)문제에 관한 연구들이 이루어지고 있는데, Papadakis & Perakis(1989)는 복수의 출발항 및 도착항 들을 가지는 물량 수송계약(Contract of Affreightment)으로 여분의 선대를 투입하는 문제를 다루었으며, Rana & Vickson(1988)은 여분의 수송 수요를 충족하기 위하여 용선한 한척의 선박을 최적하게 스케쥴링하는 문제를 혼합 정수계획법으로 정식화 하여 이를 Largrangian Relaxation및 Bender's Decomposition 기법으로 해결하고 이를 복수선박에 대하여 다시 확장하였다(Rana & Vickson, 1991). 그리고 Cho & Perakis(1994)는 컨테이너 정기선 선대의 라우팅 전략을 위한 선형계획 모형 및 혼합 정수계획 모형을 연구하였다.

3. Formulation of Problems

3.1 Formulation as Set Partitioning Problem

Brown et al.(1987)은 선박 스케줄링의 문제를 다음과 같은 Set Partitioning Problem으로 정식화하였다.

Notation

$i = 1, \ldots, n$ *cargoes,*

$k = 1, \ldots, l$ *ships,*

$j \in J(k)$ *set of feasible schedules for ship k.*

Data

$$v_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if schedule } j \text{ carries cargo } i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

c_j = *cost of schedule j*

Decision variables

$$y_j = \begin{cases} 1, & \text{if schedule } j \text{ is selected,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Formulation (Set Partitioning Problem)

$$Min \sum_j c_j y_j$$

s. t.

$$\sum_{j \in J(k)} y_j = 1 \quad \text{for each ship } k$$

$$\sum_j v_{ij} y_j = 1 \quad \text{for each cargo } i$$

$$y_j = \{0, 1\} \quad \text{for each schedule } j$$

Brown et al.(1987)은 위의 Set Partitioning Problem을 다시 ESPP(Elastic Set Partitioning Problem)으로 정식화하여 문제를 해결하고 있다.

3.2 Formulation as Set Packing Problem 1

Fisher & Rosenwein(1989)은 선박 스케줄링의 문제를 다음과 같은 Set Packing Problem으로 정식화하였다.

Notation

$i = 1, \ldots, n$ *cargoes*, $k = 1, \ldots, l$ *ships*,

J_k = *set of candidate schedules generated for ship k*,

Data

$$q_{ijk} = \begin{cases} 1, & \textit{if schedule } j \textit{ for ship } k \textit{ lifts cargo } i, \\ 0, & \textit{otherwise.} \end{cases}$$

$$c_{jk} = \sum_{i=1}^{n} q_{ijk} c_i - OC_{jk}$$

Decision variables

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \textit{if ship } k \textit{ uses schedule } j, \\ 0, & \textit{otherwise.} \end{cases}$$

Formulation (Set Packing Problem) 1

$$Max \sum_k \sum_{j \in J_k} c_{jk} y_{jk}$$

s. t.

$$\sum_{j \in J_k} y_{jk} \le 1 \quad \textit{for each ship } k$$

$$\sum_k \sum_{j \in J_k} q_{ijk} y_{jk} \le 1 \quad \textit{for each cargo } i$$

$$y_{jk} = \{0, 1\}, \ j \in J_k, \textit{ for each ship } k$$

Fisher & Rosenwein(1989)은 위의 스케줄링 문제를 Largrangean Relaxation 및 발견적 기법을 병용하여 문제를 해결하였다.

3.3 Formulation as Set Packing Problem 2

Fisher 등(1989)은 앞의 살물(Bulk-cargo) 선박의 스케쥴링에 관한 모형의 연구에서 이 모형을 전시와 같은 상황에서의 선박 스케쥴링 문제로 변형하는 등의 차후 연구과제를 지적하였다. 여기서는, 용선시장이 Charter's Market의 상황이 아니라 Owner's Market의 상황일 때, 선주의 관점에서 단기간의 선박 스케쥴링 또는 전략적 수송시기 또는 비상시의 선박 스케쥴링에 적용할 수 있는 모형으로 수정하고 이 모형의 유용성을 설명한다.

Notation

$i = 1, \ldots, n$ *cargoes*, $k = 1, \ldots, l$ *ships*,

J_k = *set of candidate schedules generated for ship k,*

Data

$$q_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if schedule } j \text{ for ship } k \text{ lifts cargo } i, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

p_i = *priority weight of cargo i*

h_k = *utility weight of ship k*

Decision variables

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{if schedule } j \text{ is selected for ship } k, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Formulation (Set Packing Problem) 2

$$Max \sum_k \sum_{j \in J_k} \Big(\sum_i q_{ijk} P_i \Big) c_{jk} y_{jk} - \sum_k \sum_{j \in J_k} h_k y_{jk}$$

s. t.

$$\sum_{j \in J_k} y_{jk} \le 1 \quad \text{for each ship } k$$

$$\sum_k \sum_{j \in J_k} q_{ijk} y_{jk} \le 1 \quad \text{for each cargo } i$$

$$y_{jk} = \{0, 1\}, \quad j \in J_k, \text{ for each ship } k$$

3.4 Formulation as Set Covering Problem

이 모형은 앞의 모형을 다른 관점에서 Set Covering Problem으로 정식화 한것이다.

Notation

$i = 1, \ldots, n$ *cargoes*, $k = 1, \ldots, l$ *ships*,

$\overline{J_k}$ = *set of all maximal schedules for ship* k,

Data

$$q_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{if cargo } i \text{ is on maximal schedule } j, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

p_i = *priority weight of cargo* i

h_k = *utility weight of ship* k

Decision variables

$$y_{jk} = \begin{cases} 1, & \text{if schedule } j \text{ is selected for ship } k, \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{if cargo } i \text{ is not carried by any schedule,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Formulation (Set Covering Problem)

$$Min \sum_i P_i z_i + \sum_k \sum_{j \in \overline{J_k}} h_k y_{jk}$$

s. t.

$$\sum_k \sum_{j \in \overline{J_k}} q_{ijk}\, y_{jk} + z_i \geq 1 \quad \text{for each cargo } i$$

$$\sum_{j \in \overline{J_k}} y_{jk} \leq 1 \quad \text{for each ship } k$$

$$y_{jk} = \{0, 1\}, \quad j \in \overline{J_k}, \text{ for each ship } k$$

$$z_i = \{0, 1\}, \quad \text{for each cargo } i$$

4. Solution Approach

4.1 LP Relaxation & Column Generation

전술한 3 절의 모형들에 대한 LP Relaxation 문제가 다음과 같다고 하자.

(Problem LP Relaxation)

$$Min \sum_j v_j x_j$$

s. t.

$$\sum_j a_j x_j = b$$

$$x_j \geq 0 \quad for\ j = 1, \ldots, n$$

여기서 a_j, b는 m-vector이고 $m < n$이다. 이 LP의 어느 기저에 관련된 simplex multipliers는

$$\pi = c_B B^{-1}$$

와 같다. 만약,

$$\min_j \overline{c_j} = c_j - \pi p_j = \overline{c_s} < 0$$

이면, x_s를 기저변수로 도입하여 해를 개선해 나간다. 일반적으로, 모든 열 p_j가 어떤 집합 S로부터 선택된다면 기저에 들어갈 열을 선택하는 문제는 다음의 subproblem을 풀면된다.

$$\min_{p_j \in S} c(p_j) - \pi p_j$$

이러한 Column generation은 특히 모형의 열의 수가 대단히 많을 때 유용하다. Column generation 이 외에도 LP Relaxation 문제를 해결하는 방법으로 Dual Ascent Algorithm 등을 사용할 수 있다.

4.2 Lagrangean Relaxation & Heuristic

전술한 3 절의 모형이 다음과 같은 0-1 정수계획법이라고 하자.

(Problem P) $\quad Minimize \quad cx$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & Ax \geq b \\ & Bx \geq d \\ & x \in (0,1) \end{aligned}$$

Problem P의 첫번째 제약식에 대하여 Largrangean dual 문제는,

(Problem LD) $\quad Maximize_{\lambda \geq 0} \quad LR(\lambda)$ 이며, 이때 $LR(\lambda)$는

($LR(\lambda)$) $\quad Minimize \quad cx + \lambda(b-Ax)$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & Bx \geq d \\ & x \in (0,1) \end{aligned}$$

와 같다. 이러한 Largrangean dual 문제의 해결에 사용되는 여러 기법으로, Lagrangean Heuristic, Problem Reduction, Subgradient Optimization, 그리고 Multiplier Adjustment 등이 있다.

4.3 Lagrangean Relaxation & Bender's Decomposition

Rana & Vickson(1988)을 참조하면 혼합 정수계획법으로 정식화하여 Largrangian Relaxation및 Bender's Decomposition 기법으로 해를 구하고 있음 을 알 수 있다.

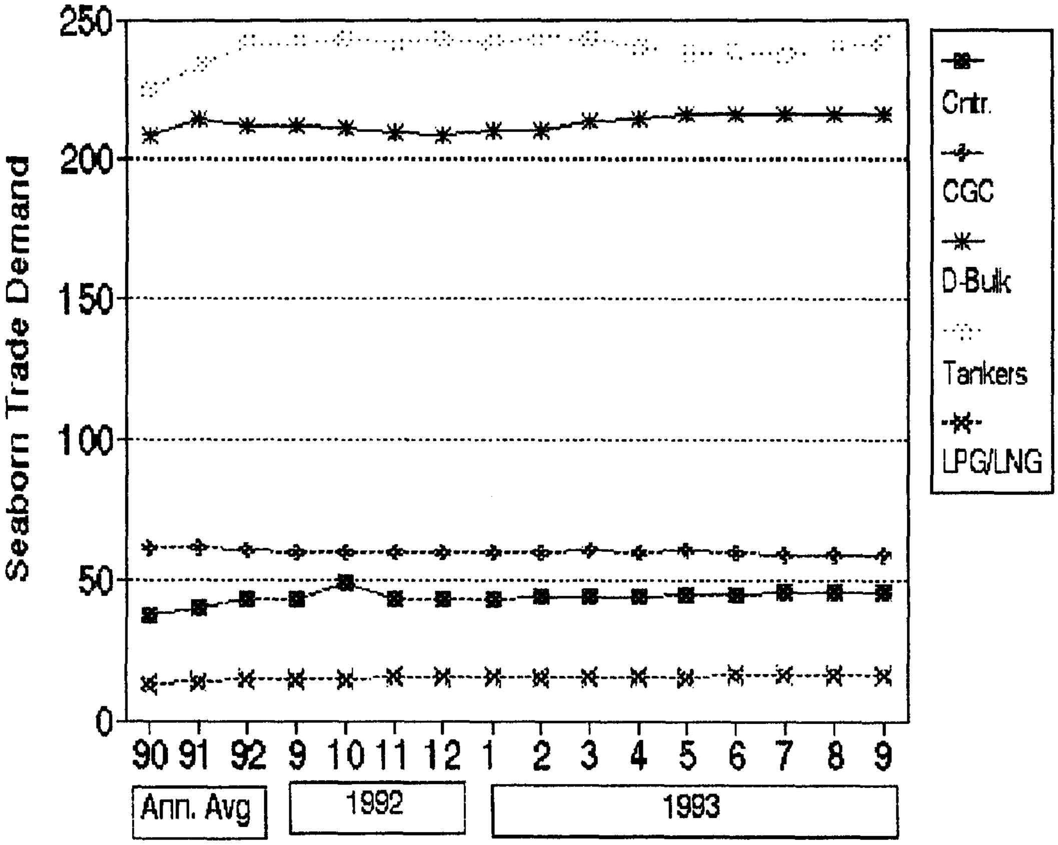
5. Considerations for Computational Experiment

일반적인 정수계획 모형의 특성상 전산 코드는 해당 문제의 모형에 알맞게 개발하여 선박 스케쥴링에 사용할 수 밖에 없다.

6. Concluding Remarks

용선시장의 상황이 변화 하거나, 전략적 수송 시기 또는 비상시의 선박 스케쥴링 등 다양한 환경변화에 적용할 수 있는 선박 스케쥴링을 위한 DSS의 구축은 매우 큰 유용성을 가질 것이다.

Figure 1. WORLD SEABORNE TRADE DEMAND TRENDS



NOTES: All figures are in million dwt except for LPG /LNG Carriers which are in million cu.m.equiv.

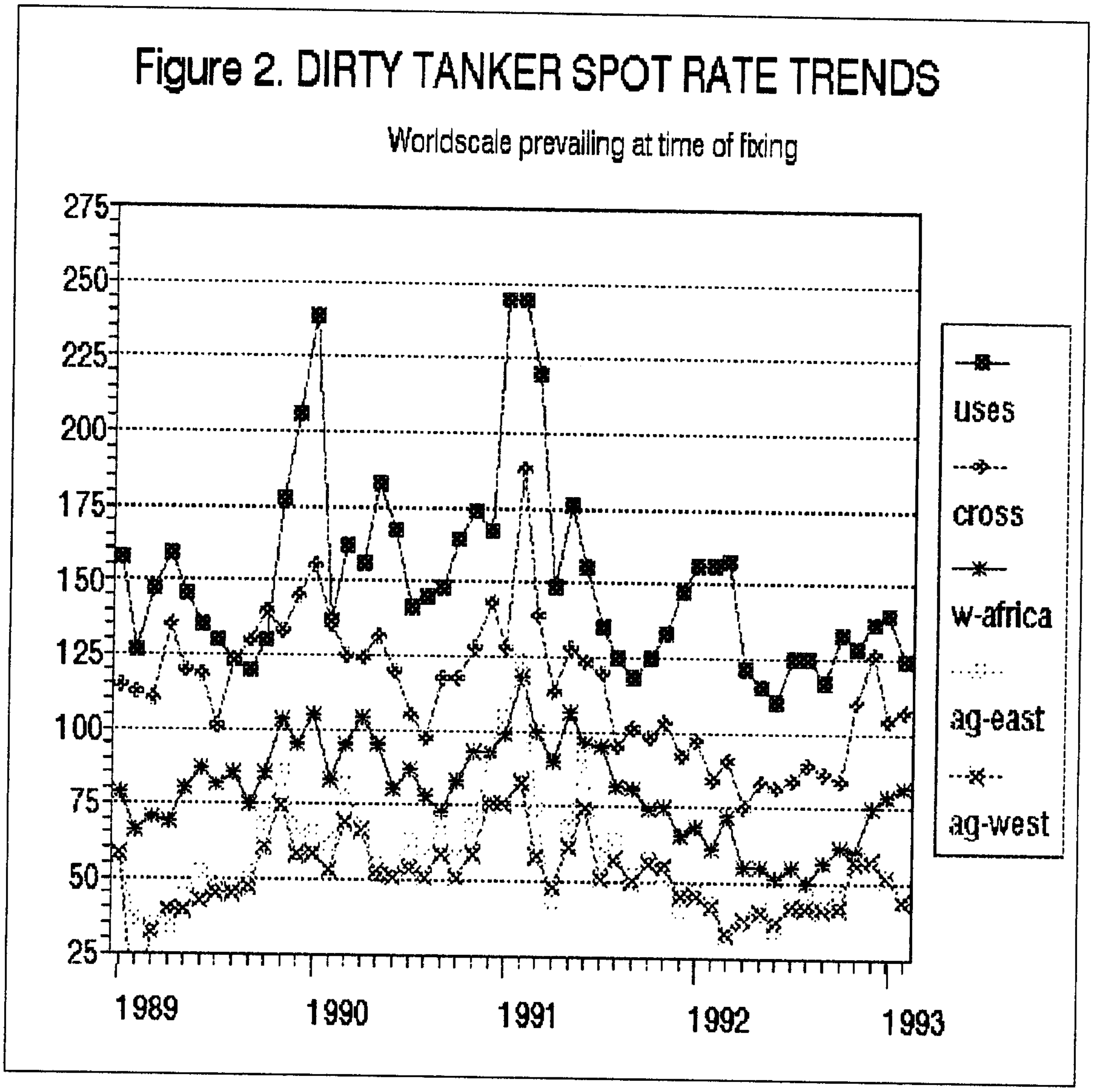


Figure 2. DIRTY TANKER SPOT RATE TRENDS
Worldscale prevailing at time of fixing
275
250
225
200
175
150
125
100
75
50
25
1989
1990
1991
1992
1993
uses
cross
w-africa
ag-east
ag-west

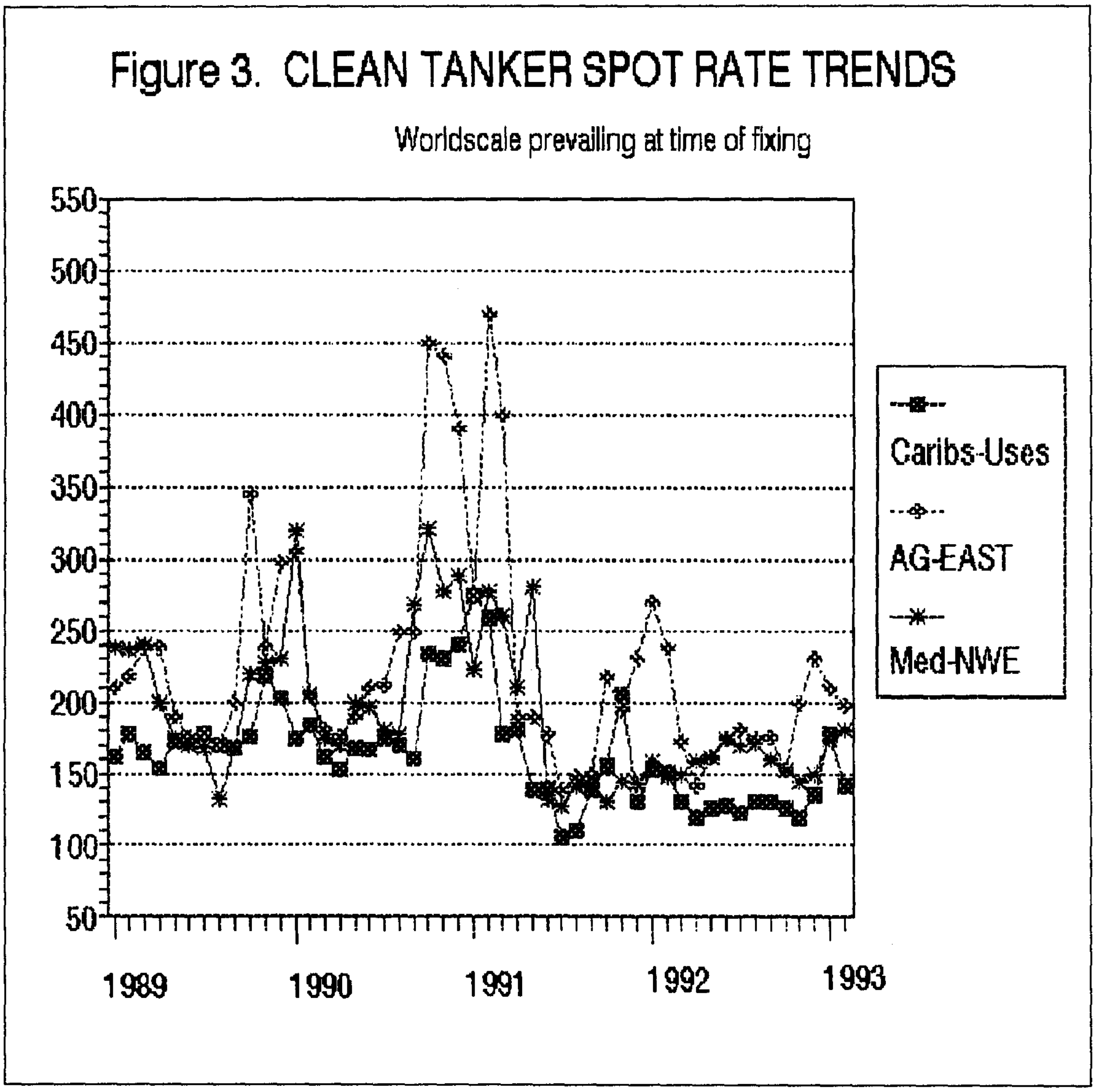


Figure 3. CLEAN TANKER SPOT RATE TRENDS
Worldscale prevailing at time of fixing
550
500
450
400
350
300
250
200
150
100
50
1989
1990
1991
1992
1993
Caribs-Uses
AG-EAST
Med-NWE