

전술적 선박 스케줄링의 최적화 분석에 관한 연구

이경근* · 김시화**

A Study on the Optimization Analysis of Tactical Ship Scheduling

Kyung-Keun Lee · Si-Hwa Kim***

..... <目 次>	
Abstract	4. 2 라그랑주 완화법(Lagrangian Relaxation)의 적용
1. 서 론	5. 전산화된 선박 스케줄링에 관한 검토
2. 문제의 설명 및 문헌 개관	5. 1 모형의 해결을 위한 전산코드 개발
3. 문제의 모형화	5. 2 전산화된 선박 스케줄링 시스템의 구축
3. 1 모형 1(Set Partitioning Problem)	6. 결 론
3. 2 모형 2(Set Packing Problem 1)	Reference
3. 3 모형 3(Set Packing Problem 2)	
4. 모형의 해법에 관한 검토	
4. 1 LP 완화법(LP Relaxation)의 적용	

Abstract

This paper treats the optimization analysis of tactical ship scheduling problems in the world seaborne bulk trade. The authors use the term 'tactical' to describe the ship scheduling problem where the owners should employ skillful tactics as an expedient toward gaining the higher profits per period in short term.

Relevant research and related problems on ship scheduling problem are reviewed briefly and a model for the tactical ship scheduling problem formulated as Set Packing Problem is introduced by modifying the previous work of Fisher(1989). The reality and practicability of the model is validated by some shipping statistics.

Proper solution approaches are outlined in the context of computational tractability in tackling the Mixed Integer Programming. Some underlying consideration for the computational experiment is also mentioned.

* 부산대학교 산업공학과

** 정회원, 한국해양대학교 해사수송학과

The authors conclude the paper with the remarks on the need of user-friendly Decision Support System for ship scheduling under varying decision environment.

1. 서 론

세계의 상선대는 크게 Liner Trade와 Bulk Trade로 구분할 수 있는 해상 무역에 투입되어 수송 서비스를 제공하고 있다. 세계 상선대에 관한 통계 자료는 1991년 중반에 전 년도에 대하여 1, 240만 총톤 증가한 것이 기록적이었다고 보고하고 있으며, Table. 1은 당시의 세계 상선대의 구성을 보여준다.

Fig. 1은 Lloyds Shipping Economist지의 자료를 바탕으로 그 이후의 상선대의 선박 공급에 관한 변화 추세를 정리한 것으로, 선박 공급의 급격한 변화는 없으며 Liner Trade의 경우 재래의 일반화물선이 완전한 퇴조를 보이는 반면에 컨테이너 선대는 꾸준히 증가하고 있고, Bulk Trade의 경우 Tankers, Dry-Bulk Carriers, 그리고 LPG/LNG Tankers 등의 선대들이 꾸준한 증가를 보여주고 있다.

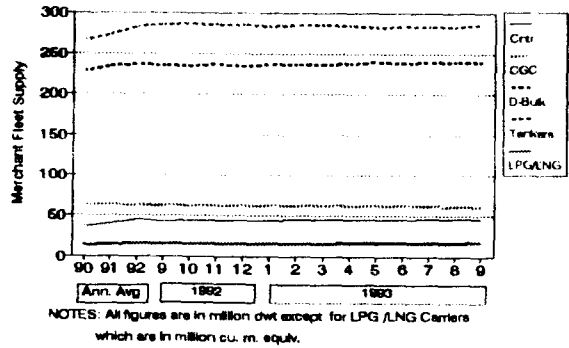


Fig. 1 World Merchant Fleet Supply Trends

Fig. 2는 Fig. 1과 같은 시기의 해상 수송 수요의 변화 추세를 정리한 것이다. 해상 수송 수요 면에서도 급격한 변화는 없고 선박 공급의 경우와 유사한 변화 추세를 보여주고 있으며 다만, 선박공급이 해상 수송 수요를 약간 상회하고 있을 뿐이다.

해운을 해상 수송 수요에 대하여 수송 서비스를 생산, 공급하는 경제활동이라 한다면, 적절한 선박

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

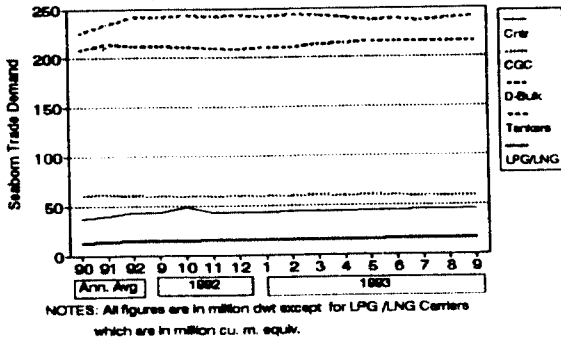


Fig. 2 World Seaborne Trade Demand Trends

스케줄링은 해운의 경제성 향상 및 해상 수송 비용의 절감의 측면에서 해운의 경영 및 운용에 기여하는 바가 매우 크다. Ronen(1993)은 선박 스케줄링의 경제적인 중요성에도 불구하고 선박 스케줄링에 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 소홀 등을 들고 있다.

이 연구에서는 먼저 2절에서 선박 스케줄링의 문제를 설명하고 이와 관련된 주요 연구들을 개관한다. 3절에서는 Fisher 등의 살물(Bulk-cargo) 선박의 스케줄링에 관한 모형을 살펴보고, 이를 선주(Owner)의 관점에서, 용선시장의 상황이 급변하는 시기, 전술적 수송 시기 또는 비상시기일 때, 그 환경의 변화에 신속히 대처하면서 단기적으로 보다 높은 경영이익을 달성할 수 있도록 선박 스케줄링의 전술을 구사할 필요가 있는 상황 곧, 전술적 선박 스케줄링의 상황에 적용할 수 있는 모형으로 변형하고, 이 모형의 유용성에 관하여 설명한다. 이어서 이러한 모형의 해법에 관하여 검토한 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 문제

들을 언급하고자 한다.

2. 문제의 설명 및 문헌 개관

선박 운항의 기본 유형으로는 흔히 정기선 운항(Liner Operation), 부정기선 운항(Tramp Operation), 그리고 화주 직접운항(Industrial Operation)의 세가지로 구분한다. 어느 유형의 선박 운항에서든 적절한 선박 스케줄링의 문제는 해운의 전략적, 전술적 국면의 중요한 의사결정 문제이며, 이러한 의사결정의 준거는 선박운항의 유형에 따라 다양하다.

Liner Operators의 경우 일반적으로, 1) 단위 기간 당 수익의 최대화, 2) 선대 활용의 최적화, 3) 최대의 또는 어느 수준의 수요의 유인 등을 들 수 있다. 한편으로 Tramp Operators의 경우에는 단위 기간 당의 수익을 최대화 하고자 할 것이며, Industrial Operators는 자사 화물의 수송 비용을 최소화 하려할 것이다.

선박의 스케줄링과 관련하여 몇몇 용어를 정리할 필요가 있다. 먼저 라우팅(Routing)은 방문하여야 할 일련의 항만을 선박에 대하여 배정하는 것을 말하며, 스케줄링(Scheduling)은 선박의 Route 상에서 발생하는 다양한 활동에 대하여 시간(time window)을 배정한다. 선대전개(Deployment)란 무역 항로 또는 임무에 대하여 선대의 선박들을 배정하는 것을 말하며, Scheduling과 Deployment가 항상 명확하게 구분되지는 않지만, 후자는 대개 동일 항로상의 연속된 여러 항해를 수행하는 선박들에 대하여 사용되며, 따라서 중장기 계획과 관련된다. 선박 스케줄링 문제의 주요 구성 요소에는 화물(Cargoes), 항만(Ports), 선박(Ships), 그리고 비용(Costs) 요소들이 있다.

선박 스케줄링 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 등(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 부정기선 운항 문제에 대한 정수계획 모형을 구하고 열 생성(Column generation) 기법과 분단 탐색법으로 이를 해결하였는데, 이 모형이 이후의 연구에 미친 영향을 이해하기 위해 그 논문의 모형 2를 다음과 같이 모형 (P0)로 변형하여 정리 하여 보았다.

Notation

$i=1, \dots, n$ ships,

$k=1, \dots, l$ cargoes,

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

Data

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

v_{ij} = value of the j 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

$$(P 0) \text{ Max } \sum_i \sum_{j \in N(i)} v_{ij} x_{ij}$$

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

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

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

여기서 중요하게 언급되어야 할 것은 Appelgren (1969, 1971) 이후 부정기선 운항 또는 화주 직접 운항의 선박 스케줄링 문제는, 가능한 선박 스케줄을 생성하는 문제와 정수 계획법으로 정식화된 모형의 해를 구하는 문제의 두 단계로 나뉘어 해결되고 있다는 점이다. 그리고 Bellmore 등(1971)은 분할 선적을 허용하는 Multivehicle Tanker Scheduling 문제를 혼합 정수계획법으로 정식화하고 이를 Dantzig-Wolfe decomposition과 분단 탐색법을 사용하여 해결하였으며, Ronen(79)은 단일 지역에서 발생하는 화물을 수송하는 선박의 스케줄링 문제를 다루었다.

McKay & Hartley(1974)가 혼합 정수 계획법에

의한 전산화 된 Tankers의 스케줄링에 관하여 다룬 것을 시작으로, Miller(1987), Brown 등(1987), Fisher & Rosenwein(1989), 그리고 Bausch 등(1991)이 Mainframe, VAX, 그리고 마이크로 컴퓨터 등에 접목할 수 있는 대화형 선박스케줄링 시스템의 구축에 관하여 연구하였다.

그리고 비교적 최근에는 정기선 운항에 대한 선대 규모결정 및 선대전개(Fleet size, mix & deployment)문제에 관한 연구들이 이루어지고 있는데, Papadakis & Perakis(1989)는 선대의 여분의 선박들을 복수의 출발항 및 도착항들을 가지는 물량 수송 계약(Contract of Affreightment)에 투입하는 문제를 다루었으며, Rana & Vickson(1988)은 여분의 수송 수요를 충족하기 위하여 용선한 한 척의 선박을 최적으로 스케줄링하는 문제를 혼합 정수 계획법으로 정식화하여 이를 Lagrangian Relaxation 및 Bender's Decomposition 기법으로 해결하고 이를 복수선박에 대하여 다시 확장하였다(Rana & Vickson, 1991). 그리고 Cho & Perakis(1994)는 컨테이너 정기선 선대의 라우팅 전략을 위한 선형 계획 모형 및 혼합 정수계획 모형을 연구하였다.

3. 문제의 모형화

이 연구가 주안하고자 하는 Bulk Trade에서의 선박 스케줄링 문제는 Appelgren(1969, 1971)의 경우가 그 효시라 할 수 있다. 이 연구 이후로 부정기선 운항 또는 화주 직접운항의 선박 스케줄링 문제는 집합 분할(Set Partitioning) 또는 집합 패킹(Set Packing) 문제와 같은 정수계획법으로 모형화되고 있다. 여기서는, 선박 스케줄링에 관한 최근의 연구들 중에서 Brown 등(1987)의 집합 분할 모형과 Fisher & Rosenwein(1989)의 집합 패킹 모형을 살펴보고, Owner의 입장에서 단기간의 선박 스케줄링이나 전술적 수송시기 또는 비상시의 선박 스케줄링에 적용할 수 있도록 수정된 모형을 제시하면서 이 모형의 유용성을 설명한다.

3.1 모형1(Set Partitioning Problem)

Brown 등(1987)은 중동에서 유럽 및 북미 지역

으로 원유를 수송하는 메이저 석유회사의 Tanker 스케줄링 문제 곧 화주 직접 운항의 선박스케줄링 문제를 다음과 같은 집합 분할 문제로 정식화하였다.

Notation

- $i=1, \dots, n$ cargoes,
- $k=1, \dots, l$ 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

$$(P1) \text{ Min } \sum_j c_j y_j$$

s.t.

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

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

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

모형 (P1)의 첫번째 제약식은 계획기간 동안 각 선박은 정확히 하나의 스케줄을 따를 것을 요구하며 두번째 제약식은 모든 화물이 적재되어야 한다는 제약조건이다. Brown 등(1987)은 위의 집합 분할 문제를 다시 ESPP(Elastic Set Partitioning Problem)으로 변형하여 문제를 해결하고 있다.

3.2 모형 2(Set Packing Problem 1)

Fisher & Rosenwein(1989)은 살물(Bulk-Cargo) 선박 스케줄링의 문제를 다음과 같은 집합 패킹 문제로 정식화하였다.

Notation

- $i=1, \dots, n$ cargoes,
- $k=1, \dots, l$ ships,
- J_k = set of candidate schedules generated for ship k ,

Data

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

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

Decision variables

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

Formulation

$$(P2) \text{ Max } \sum_k \sum_{j \in J_k} c_{jk} y_{jk}$$

s.t.

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

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

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

여기서 모형 (P2)의 목적함수의 계수 c_{jk} 에 들어 있는 c_i 는 cargo i 에 대한 용선 요율이며, OC_{jk} 는 통제 선대 내의 선박 k 를 계획 기간 동안 계선시키지 않고 스케줄 j 로 운항할 경우의 추가 경비를 나타낸다. 따라서 c_{jk} 를 스케줄 j 상의 화물들을 용선한 선박으로 실어나를 경우, 그 용선비에서 스케줄 j 를 사용하는 선박 k 의 운항 비용을 제한 이익에 해당한다. 그리고 첫번째 제약식은 계획기간 동안 각 선박에 대하여 많아야 하나의 스케줄이 배정됨을 나타내며 두번째 제약식은 각 화물이 많아야 하나의 선박에 의해 수송되어야 한다는 제약조건이다.

Fisher & Rosenwein(1989)은 미 해군의 MSC (Military Sea Lift) 휘하의 Tanker 스케줄링에 관한 과거의 데이터를 바탕으로 위와 같은 선박 스케줄링의 문제를 정식화하고 이를 라그랑주 완화법 및 발견적 기법을 병용하여 해결하였다.

3.3 모형 3(Set Packing Problem 2)

Fisher 등(1989)은 앞의 살물(Bulk-cargo) 선박의 스케줄링에 관한 모형의 연구에서 이 모형을 전시와 같은 상황에서의 선박 스케줄링 문제로 변형하는 등의 차후 연구과제를 언급한 바 있다. 여

기서는, 선주의 관점에서, 용선 시황의 변화에 대처하면서 전술적 수송 시기 또는 비상시기에 신속하게 수행하여야 할 단기간의 전술적 선박 스케줄링에 적용할 수 있는 모형을 도입하고, 이 모형의 유용성에 관하여 설명한다.

Fig. 1과 Fig. 2의 설명에서 언급하였듯이 최근의 용선 시황은 선박공급이 해상 수송 수요를 약간 상회하는 Charterer's Market이라 할 수 있다. 그런데 같은 시기의 Dirty tanker 용선 요율의 변화 추세를 Fig. 3과 같고, Clean tanker의 용선 요율의 변화 추세를 Fig. 4와 같다.

Fig. 3과 Fig. 4에 나타나 있는 Worldscale은 Tanker의 운임에 관한 것으로, Bulk Trade의 대표 주자 격인 Tanker의 기준 운임이 1969년 9월 15일 Worldscale Association(N.Y.) Inc.에 의해 통일되어 이른바 Worldscale Rate로 간행된 이후 개정을 거듭하던 중 런던과 뉴욕의 Worldscale 협회가 연구와 검토를 거쳐 완성한 The New Worldscale Tanker Nominal Freight Scale이 1989년 1월 1일부터 시행되게 되었으며, 이를 약하여 New Worldscale이라 부른다. 이러한 기준 운임은 표준선형의 선박이 특별한 지정이 없는 한 적양지 간의 최단 거리 또는 가장 경제적인 항로를 선택하여 항해하는 것으로 가정하고 \$/mTon 으로 산정되어 Worldscale Rate 100(Ws100)으로 표시된다.

Fig. 3과 Fig. 4는 선주의 관점에서 바라볼 때, 전술적인 화물확보를 통하여 단기적으로 기간당

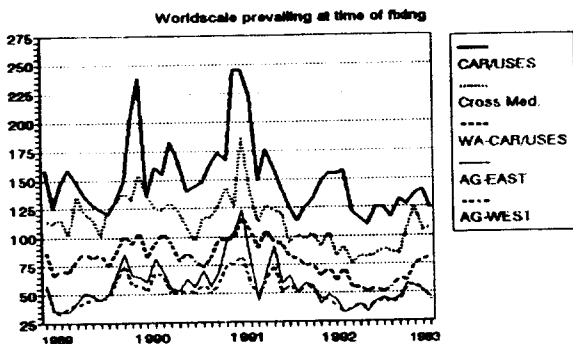


Fig. 3 Dirty Tanker Spot Rate Trends

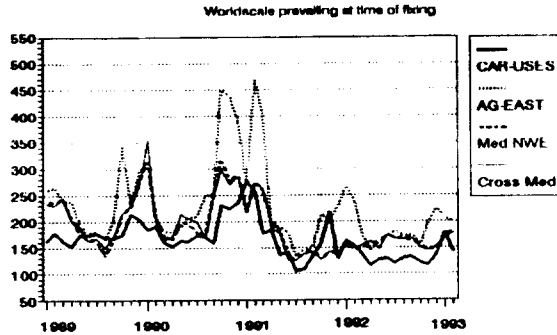


Fig. 4 Clean Tanker Spot Rate Trends

경영이익의 증대를 꾀하지 않으면 안될 중요한 이유를 함축하고 있음을 알 수 있다. 다시 말하면, 세계 상선대의 선박의 공급은 미세하게 Charterer's Market을 형성하고 있고 선박의 공급은 대단히 완만한 변화를 보여주고 있는 반면에, 같은 시기의 어떤 항로의 화물에 대한 용선요율은 대단히 첨예하게 변화하여 왔다는 것이다. 여기서 전술적 선박 스케줄링이라 하는 것은, 선주가 용선 시황의 변화에 신속히 대처하면서 단기적으로 보다 높은 경영이익의 달성을 위한 방편으로 고도의 전술을 구사하여 운임 수익이 높은 화물을 확보할 수 있도록 선박을 스케줄링하는 것을 의미한다.

이때, 화물에 대한 용선계약의 체결이 곧 선박의 스케줄링과 직결되며 운임 수익이 높은 화물들에 대하여 높은 priority weight를 부여하고 보유 선박에 대한 utility weight를 고려하여 선박을 스케줄링하는 것이 중요한 문제가 된다. 화물의 priority는 용선 계약 체결 시의 Worldscale 지표가 될 수 있으며, 다만 표준선형(총 수송능력이 75,000 mTon인 선박)이 아닌 경우에는 그 선박에 대하여 환산한 priority가 부여되어야 한다. 이 경우, 모형 (P2)는 다음과 같이 수정된 집합 패킹 모형(P3)로 정식화 할 수 있다.

Notation

$i=1, \dots, n$ cargoes,

$k=1, \dots, l$ ships,

$J_k = \text{set of candidate schedules generated for ship } k,$

Data

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

p_{ik} = priority weight of cargo i for ship k

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

$$(P3) \text{ Max } \sum_k \sum_{j \in J_k} \left(\sum_i q_{ijk} p_{ik} \right) y_{jk} - \sum_k \sum_{j \in J_k} h_k y_{jk}$$

s.t. $\sum_{j \in J_k} y_{jk} \leq 1$ for each ship k

$$\sum_k \sum_{j \in J_k} q_{ijk} y_{jk} \leq 1$$
 for each cargo k

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

여기서 모형 (P3)의 목적함수는 보유 선박의 선박 k 를 계획 기간 동안 운항할 때, 화물의 수송에 투입된 선박의 utility의 총합에 대하여 산출되는 운임수익이 최대화 되게 하고자 하는 것이다. 그리고 첫번째 제약식은 계획기간 동안 각 선박에 대하여 많아야 하나의 스케줄이 배정됨을 나타내며 두번째 제약식은 각 화물이 많아야 하나의 선박에 의해 수송되어야 한다는 제약조건이다.

용선 계약은 용선자들에 의해 용선 시장에 개방된 선복수요 곧 화물에 대하여 선주가 통상 broker를 통해 선복제공의 의지를 알리는 offer를 등록하고 협상과정을 거치면서 성약여부가 결정된다. 이 과정 중에 선주는 선박의 명세, 적지 도착 예정, 그리고 선주의 용선요율 등을 알리면서 offer의 의지를 표명하게 되는데 용선 계약의 성약은 곧 그 선박의 스케줄을 결정짓는 것이 된다. 따라서 용선계약의 성약과정에서 신속한 의사결정을 통하여 운임수익이 높은 화물을 확보하는 것은 단위 기간당 이익을 최대화하는 요체가 되며, (P3)는 이러한 의사결정에 적용할 수 있는 모형이다. 이외에도 모형 (P3)는 전시 또는 비상시기의 수송 문제에도 문제의 성격에 맞추어 수정 또는 변형하여 적용할 수 있는 유용한 모형이라 하겠다.

4. 모형의 해법에 관한 검토

일반적으로 최적화 모형들은 두가지 유형의 문제로 분류된다. 그 하나는 다항식 알고리즘이 존재하는 쉬운 문제 유형이며, 다른 하나는 다항식 알고리즘이 알려져 있지 않은 어려운 문제 유형이다. 전자를 P-문제라 하고 후자를 NP-문제(Nondeterministic Polynomial의 약자)라 하며 대부분의 정수계획 모형은 후자에 속한다. NP-문제는 다시 NP-complete 문제와 그렇지 않은 문제들로 구분되는데, NP-complete 문제는 NP-문제들중 가장 어려운 문제들로 이루어진 NP-문제의 집합으로, NP-complete 문제중의 어느 하나에 대한 다항식 알고리즘이 발견된다면 NP-complete 문제들 전부가 P-문제가 되는 그런 성질을 갖는다고 정의한다.

전질의 집합 분할 모형 또는 집합 패킹 모형들은 0-1 정수 계획 모형의 특수한 경우들에 해당하며 NP-문제들이다. 이러한 문제들을 해결하는 방법으로는, 1)해결이 쉬운 어느 특수한 경우를 먼저 고려한 후 이를 일반화하여 나가는 방법, 2)다항식 계산량을 갖는 근사해법이나 발견적 해법을 사용하여 최적해에 가까운 해를 구하는 방법, 3)복잡한 문제를 분해하여 해결하는 방법, 4)완화법을 사용하여 가능한 한 최적해에 가까운 상한 또는 하한을 구하고 이로부터 효율적으로 최적해를 탐색하여 나가자 하는 방법 등이 있다. 여기서는 완화법을 사용하는 경우를 주로하여 LP 완화법과 라그랑주 완화법을 중심으로 그 해법 절차들을 설명한다.

4.1 LP 완화법(LP Relaxation)의 적용

0-1 정수 계획 모형의 특수한 경우들에 해당하는 집합 분할 모형 또는 집합 패킹 모형들에 대한 LP 완화 문제가 다음과 같다고 하자.

$$(LPR) \text{ Min } \sum v_j x_j$$

s.t. $\sum a_j x_j = b$

$$x_j \geq 0 \text{ for } j=1, \dots, n$$

여기서 a_j, b 는 m -vector이고 $m < n$ 이다. 이

(LPR)의 어느 기저에 관련된 simplex multipliers
는

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

와 같다. 만약,

$$\min_j \bar{v}_j = v_j - \pi a_j = \bar{v}_s < 0$$

이면, x_s 를 기저변수로 도입하여 해를 개선해 나간다. 일반적으로, 모든 열 a_j 가 어떤 집합 S 로부터 선택되고 그 열의 수가 대단히 많을 때, 기저에 들어갈 열을 다음의 subproblem을 풀어서 선택하는 방법을 가리켜 열 생성 기법이라 한다.

$$\min a_j \in S \quad v(a_j) - \pi a_j$$

이러한 열 생성 기법은 3절에서 소개된 모형들에 대한 해법에 유용한데 그 까닭은 선박의 가능한 스케줄의 수가 대단히 많기 때문이다.

이외에도 이 (LPR)문제의 해법으로 Dual ascent algorithm을 들 수 있는데, 이는 (LPR)의 원문제의 최적 정수해는 (LPR)의 최적해보다 같거나 크며, (LPR)의 최적해는 그 쌍대 문제(DLPR)의 최적해와 같고, (DLPR)의 최적해는 임의의 (DLPR)의 가능해보다는 같거나 크다는 성질을 이용하여, 임의의 가능해로부터 (LPR)의 최적해를 찾아 올라가는 기법이다.

이렇게 하여 (LPR)의 최적해를 구하면 이를 원문제의 최적 정수해의 하한으로 두고 분단 탐색법 등의 기법을 사용하여 최적해 방향으로 탐색을 계속할 수 있다.

4.2 라그랑주 완화법(Lagrangian Relaxation)의 적용

선박 스케줄링에 관한 문제의 모형이 다음과 같은 0-1 정수계획법으로 정식화되었다고 하자.

$$\begin{aligned} (P) \quad & \text{Minimize } cx \\ & \text{s. t. } \quad Ax \geq b \\ & \quad \quad bx \geq d \\ & \quad \quad x \in (0, 1) \end{aligned}$$

모형 (P)의 첫번째 제약식에 대한 라그랑주 완화를 $LR(\lambda)$ 라 하면, 라그랑주 쌍대 문제(LD)는 다음과 같이 된다.

$$(LD) \quad \text{Maximize } \lambda \geq 0 \quad LR(\lambda)$$

이때, 라그랑주 완화 문제 $LR(\lambda)$ 는

$$\begin{aligned} (LR(\lambda)) \quad & \text{Minimize } cx + \lambda(b - Ax) \\ & \text{s. t. } \quad Bx \geq d \\ & \quad \quad x \in (0, 1) \end{aligned}$$

와 같다. 라그랑주 쌍대 문제의 해결에 사용되는 여러 기법으로, $LR(\lambda)$ 의 해를 원문제의 가능해로 변환하여 이를 원문제의 최적해에 대한 상한으로 사용하고자 하는 라그랑주 heuristic이나 $LR(\lambda)$ 의 해를 원문제의 크기의 축소에 사용하고자 하는 Problem reduction 등의 기법과 (LD)를 풀기 위한 Subgradient optimization, 및 Multiplier adjustment 등의 기법들이 있다.

(LD)의 최적해를 구하면 이를 원문제의 최적 정수해의 하한으로 두고 분단 탐색법 또는 여러가지 발견적 기법들을 사용하여 최적해 방향으로 탐색을 계속할 수 있다. 이러한 라그랑주 완화법은 원문제인 정수계획 모형의 최적해에 대한 좋은 하한을 구하기 위하여 또다른 정수계획 모형을 해결해야 한다는 점 때문에 일견 유용한 접근법으로 보이지 않을 수 있다.

그러나 라그랑주 완화법이 정수계획 문제의 해결에 잘 사용되는 까닭은, 첫째로 많은 최적화 문제들이 그 까다로운 제약 조건들을 완화시켜 목적함수로 올려버리면 쉽게 풀리는 P-문제로 변한다는 점, 둘째로 라그랑주 완화법에 의한 실제 문제의 해결 경험에서 적절한 계산 비용으로 대단히 좋은 하한을 얻을 수 있었다는 점 등에 있다. Rana & Vickson(1988)은 혼합 정수계획법으로 정식화한 컨테이너 선박의 스케줄링 모형에 대하여 라그랑주 완화법 및 Bender's Decomposition 기법을 사용하여 문제를 해결하기도 하였다.

5. 전산화된 선박 스케줄링에 관한 검토

5.1 모형의 해결을 위한 전산코드 개발

적절한 선박스케줄링은 해운의 전략적, 전술적 국면의 중요한 의사결정 문제이며, 문제 자체의 불확실성, 문제 구조의 다변성, 그리고 해운 환경의 불안정성 등의 원인으로 선박 스케줄링은 대단히 다양하면서도 복잡한 문제들을 포함한다. 이 연구에서 주안한 Bulk Trade에서의 선박 스케줄링의 최적화 모형들은 정수계획 모형의 특수한 유형들로 정식화할 수 있었는데, 정수 계획 모형에 대하여는 선형 계획 모형의 경우와는 달리 여러 유형의 모형에 사용할 수 있는 일반화된 전산코드가 없다. 따라서 해당 선박 스케줄링 모형의 해법에 알맞게 효율적인 전산코드를 개발하지 않으면 안된다.

또한 전절에서 다룬 여러 해법절차들의 효율성을 문제 유형에 따라 비교하고 검토하는 계산 실험을 위하여 적절한 전산코드들을 준비하여야 한다. LP 완화법에 의한 해법 절차에서는 LP 완화 문제(LPR)과 기저에 들어갈 열을 생성하기 위한 subproblem 그리고 (LPR)의 쌍대 최적해는 임의의 (LPR)의 쌍대 가능해 보다는 같거나 크다는 성질을 이용하는 Dual ascent algorithm에는 안정된 LP 코드가 요구되며, 이를 바탕으로 분단 탐색법 등의 기법을 결합하여 해당되는 유형의 문제 모형을 풀어주는 전산 코드가 일체로 구축되어야 한다.

라그랑주 완화법에 의한 해법 절차에서 라그랑주 완화 문제 $LR(\lambda)$ 는 종종 배낭 문제와 같은 표준 문제가 되는 경우가 많으며, 이러한 표준 문제들을 위한 전산코드는 상용의 소프트웨어로도 나와 있다. 그러나 라그랑주 완화 문제 $LR(\lambda)$ 의 해를 원문제의 가능해로 변환하여 이를 원문제의 최적해에 대한 상한으로 사용하고자 하는 라그랑주 heuristic이나 $LR(\lambda)$ 의 해를 원문제의 크기의 축소에 사용하고자 하는 Problem reduction을 위한 전산코드가 개발되어야 하며, 또한 라그랑주 쌍대 문제 (LD)를 풀기 위한 Subgradient optimization

및 Multiplier adjustment 기법의 전산 코드들을 개발하여, 이를 다시 분단 탐색법 등의 기법과 결합함으로써 해당되는 유형의 문제 모형을 해결하는 전산 코드를 일체로 구축하여야 한다.

5.2 전산화된 선박 스케줄링 시스템의 구축

해운 환경의 불안정성, 국제성, 개방성 등이 원인이 되어 운용적 국면의 의사결정을 상대적으로 소홀히 여기는 풍토와 해운 기업의 보수성 등을 고려할 때, 용선시장의 상황이 급변하는 시기, 전술적 수송 시기 또는 비상시기 등 다양한 환경변화에 신속히 적용할 수 있는 선박 스케줄링을 효과적으로 지원하기 위해서는 사용자에게 친숙한 환경으로 전산화된 의사결정 지원시스템의 구축이 필요하다.

선박 스케줄링 모형의 해법에 알맞게 효율적인 전산코드를 개발하는 일도 대단히 시간이 소요되는 일일 뿐만아니라 어려운 작업 중의 하나이다. 더우기 다양한 유형의 선박 스케줄링을 효과적으로 지원하여 주는 전산화된 선박 스케줄링 시스템을 구축하는 문제는 보다 더 많은 시간이 소요될 것이며 작업의 어려움도 더 커질 것이다.

따라서 선박 스케줄링을 위한 의사결정 지원시스템의 구축을 위하여는 다양한 유형의 문제 하나 하나에 대하여 문제를 해결하여 나가되, 이러한 연구의 결과를 재사용할 수 있도록 객체 위주 프로그래밍 등의 기법을 도입하는 것이 필연적으로 요구된다. 이러한 과제들은 차후의 과제로 삼고자 한다.

6. 결 론

이 연구는 선박 스케줄링에 관련된 주요 연구들을 살펴보고 특히 Bulk Trade에서의 선박 스케줄링에 주안하여, 용선시장의 상황이 급변하는 시기, 전술적 수송 시기 또는 비상시기에 선주(Owner)의 관점에서 이러한 환경변화에 신속히 대처하면서 단기적으로 보다 높은 경영이익을 달성할 수 있도록 고도의 기술을 구사하여 운임 수익이 높은

화물을 확보할 필요가 있는 상황의 선박 스케줄링 곧, 전술적 선박 스케줄링 문제를 다루었다.

이러한 의사결정 환경의 현실성은 Bulk Trade의 대표 주자 격인 Tanker의 경우, 선복 공급의 완전한 변화에도 불구하고 그 용선 요율이 첨예하게 변화하였던 통계 자료에서 확인한 바 있다. 용선 시장에 개방된 화물에 대하여 선복제공의 의지를 offer로 등록하고 협상과정을 거쳐 용선계약이 성약되면 그 선박의 스케줄이 결정되어버리므로 용선계약의 성약과정에서 신속한 의사결정으로 운임 수익이 높은 화물을 확보하여 선대의 선박들을 스케줄링하는 것은 단위 기간당 이익을 최대화하는 요체가 되며, 이러한 의사결정을 위한 모형으로 (P3)는 매우 유용한 것이다. 이외에도 모형 (P3)는 전시 또는 비상시기의 수송 문제에도 문제의 성격에 맞추어 수정 또는 변형하여 적용할 수 있는 유용한 모형이다.

해운의 전략적, 전술적 국면의 중요한 의사결정 문제인 선박스케줄링은 문제 자체의 불확실성, 문제 구조의 다변성, 그리고 해운 환경의 불안정성 등의 원인으로 대단히 다양하고도 복잡한 문제들을 포함하고 있으며, 이러한 선박 스케줄링의 최적화 문제를 해결하여 주는 전산화된 시스템의 필요성은 아무리 강조하여도 지나치지 않다. 특히 정수계획 모형의 특수한 유형들로 정식화되는 선박 스케줄링의 경우 정수계획 모형의 특성 상 그 모형의 적절한 해법에 알맞는 효율적인 전산코드를 개발하지 않으면 안된다.

또한 해운 환경의 불안정성, 국제성, 개방성 등이 원인이 되어 운용적 국면의 의사결정을 상대적으로 소홀히 여기는 풍토와 해운 기업의 보수성 등을 고려할 때, 다양한 환경변화에 신속히 적용할 수 있는 선박 스케줄링을 효과적으로 지원하기 위해서는 사용자에게 친숙한 환경으로 전산화된 의사결정 지원시스템의 구축이 필수적이며, 앞으로 이에 관한 연구들이 중요한 연구 과제가 될 것이다.

References

- Dantzig, G. B., and D. Fulkerson(1954), "Minimizing the number of tankers to meet a fixed schedule", *Naval Research Logistics Quart.* 1, 217-222.
- Briskin, L. E.(1966), "Selecting delivery dates in the tanker scheduling problem", *Management Science* 12, B224-234.
- Laderman, J.(1966), "Vessel allocation by linear programming", *Naval Research Logistics Quart.* 13, 315-320.
- Whiton, J. C.(1967), "Some constraints on shipping in linear programming models", *Naval Research Logistics Quart.* 14, 257-260.
- Bellmore, M.(1968), "A maximum utility solution to a vehicle constrained tanker scheduling problem", *Naval Research Logistics Quart.* 15, 403-411.
- Appelgren, L. H.(1969), "A column generation algorithm for a ship scheduling problem", *Transportation Science* 3, 53-68.
- Appelgren, L. H.(1971), "Integer programming methods for a vessel scheduling problem", *Transportation Science* 5, 64-78.
- Bellmore, M., G. Bennington and S. Lubore(1971), "A multi-vehicle tanker scheduling problem", *Transportation Science* 5, 36-47.
- Mckay, M. D.(1974), "Computerized scheduling of seagoing tankers", *Naval Research Logistics Quart.* 21, 255-264.
- Ronen, D.(1979), "Scheduling of vessels for shipment of bulk and semi-bulk commodities originating in a single area", Unpublished. Ph. D. Dissertation, The Ohio State University.

- Ronen, D.(1983), "Cargo ships routing and scheduling:Survey of models and problems", *European Journal of Operational Research* 12, 119-126.
- Miller, D. M.(1987), "An interactive computer-aided ship scheduling system", *European Journal of Operational Research* 32, 363-379.
- Brown, G. G., G. W. Graves, and D. Ronen(1987), "Scheduling ocean transportation of crude oil", *Management Science* 33, 335-446.
- Kim, S. H.(1988), "The literature survey on the applied decision analysis to shipping and port transportation", *J. of Korea Institute of Navigation* 12, 113-136.
- Nemhauser, G. L. and L. A. Wolsey(1988), *Integer and Combinatorial Optimization*, John Wiley & Sons.
- Rana, K, and R. G. Vickson(1988), "A model and solution algorithm for optimal routing of a time-chartered containership", *Transportation Science* 22, 83-95.
- Papadakis and Perakis(1989), "A nonlinear approach to the multiorigin, multideestination fleet deployment problem", *Naval Research Logistics* 36, 515-528.
- Fisher, M. L., and M. B. Rosenwein(1989), "An interactive optimization system for bulk-cargo ship scheduling", *Naval Research Logistics* 36, 27-42.
- Bausch, D. O., G. G., Brown, and D. Ronen(1991), "Elastic set partitioning-A powerful tool for scheduling transportation of oil and gas", *Advances in Operations Research in the Oil and Gas Industry*, Editions Technip, Paris, 151-162.
- Rana, K, and R. G. Vickson(1991), "Routing container ships using Lagrangean relaxation and decomposition", *Transportation Science* 25, 201-214.
- Ronen, D.(1993), "Ship scheduling: The last decade", *European Journal of Operational Research* 71, 325-333.
- Cho, S. C., and A. N. Perakis(1994) "Linear and integer linear programming models for container liner fleet routing strategy", Working Paper, KMU.
- Shipping Statistics and Economics(1989-1993)*, Drewry Shipping Consultants Ltd.
- Lloyd's Shipping Economist(1990-1994)*, Lloyd's of London Press Ltd.