

새로운 중심항만(Hub Port)을 고려한 정기선 최적항로 결정을 위한 혼합정수계획모형

조 성 철*·신 유 정**

《目 次》

I. 서론	3. 완성된 혼합정수계획 모형
II. 문제의 개요 및 가정	4. 최적해의 관리적 해석
1. 모형의 가정	IV. 사례분석
2. 모형의 기호	1. 문제 설명
III. 최적항로 결정 모형	2. 최적항로 결정 모형
1. 목적함수	3. 최적해의 도출 및 해석
2. 제약식	V. 결론

I. 서론

정기선 해운의 운항항로는 한번 결정되면 한동안 변동 없이 고정된 채로 선박을 운항하게 된다. 이는 정기선 운항항로를 계획하는 의사결정이 일정기간 동안 지속적으로 정기선사의 경제적 이익에 영향을 주게 됨을 의미한다. 최근 컨테이너 선박의 대형화에 따라 정기선 한 항차 당 최소 4,000TEU에서 8,000TEU가 넘는 많은 양의 화물을 수송하기도 한다. 따라서 최근의 대형 정기선에 대한 항로결정 문제는 선사의 경제적 이익과 경쟁력을 결정적으로 좌우하는 매우 중요한 전략적 의사결정 문제라고 할 수 있다.

선사들은 규모의 경제를 실현하기 위해 선박을 대형화 하고 전략적 제휴로 운항효율성을 증대시키려는 노력과 더불어 허브-스포크 네트워크의 활용을 점차로 증대시키고 있다. 즉, 대형선박들은 세계일주서비스와 시계추서비스의 형태로 중심항만(hub port)이라 불리는 전

* 한국해양대학교 해운경영학부 교수, cho@hhu.ac.kr

** 진양해운, 9728056@hanmail.net

세계 주요 물류거점만을 운항하며, 중심항만에서 최종 목적지인 여러 주변항만(feeder port)까지 환적 운항을 통해 화물을 운송한다. 이러한 환적 운항에는 비교적 소규모의 자선(feeder ship)을 활용하게 된다. 대규모의 화물운송은 주로 중심항만들 간에만 발생하기 때문에, 중심항만들을 연결하는 주된 정기선 항로의 개발과 이를 주변항만들과 종합적으로 연결하는 시스템적 관리의 필요성이 증가하고 있다. 또한 최근 많은 국가들이 물류거점의 입지를 확보하고자 경쟁적으로 자국의 중심항만 개발계획을 추진하고 있다는 사실을 고려할 때, 선사의 입장에서는 이러한 새로운 중심항만들을 항로에 포함시켜야 할 것인가 하는 의사결정에 직면하게 된다. 이 논문은 바로 이러한 기회가 주어진 상황에서 정기선사가 어떻게 새로운 최적항로를 찾을 수 있을 것인가를 최적화모형개발을 통해 설명하고자 한다.

중심항만과 주변항만의 연결을 종합적으로 다루는 의사결정문제는 최근에 항공산업¹⁾⁻²⁾, 통신 네트워크³⁾ 디자인에 많이 적용되고 있는 허브-스포크 체계(hub and spoke system)의 의사결정문제로 볼 수 있다. 그러나 해상운송의 경우는 아직 이에 대한 연구가 상대적으로 매우 부족한 실정이다⁴⁾. 이러한 상황을 고려하면서 이 논문은 해운산업에 허브-스포크 네트워크의 개념을 적용하여 새로운 중심항만의 활용이 가능할 경우 선사의 입장에서 최적의 정기선항로를 발견할 수 있는 의사결정모형을 제안하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 다음 장인 II장에서는 문제의 개요 및 가정을 서술하였고, III장에서는 이를 토대로 정기선 경로선택을 위한 최적화 모형을 제시하였다. IV장에서는 III장에서 제시한 모형을 대상으로 가상적인 선사의 최적항로 결정 문제에 대한 사례연구를 시도하였다. 끝으로 V장에서는 본 연구에 대한 요약과 향후 연구방향을 논의하였다.

II. 문제의 개요 및 가정

주요 화물흐름에 대한 예측치가 주어져 있다면 이를 통한 주요 운임수익은 고정되어 있다

- 1) M. E. O'Kelly, A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities, *European Journal of Operational Research*, vol. 32, 1987, pp. 393-404.
- 2) M. Sasaki, A. Suzuki and Z. Drezner, On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system, *Computers & Operations Research*, vol. 26, 1999, pp. 1411-1422.
- 3) R. S. Cahn, *Wide Area Network Design: Concepts and Tools for Optimization*, San Francisco, *Morgan Kaufmann Publishers*, 1998.
- 4) C.-I. Hsu and Y.-P. Hsieh, Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network, *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 45, 2007, pp. 899-916 (to appear).

고 볼 수 있고, 최대 이익을 위한 의사결정은 결국 최소 운항비용을 위한 의사결정과 같게 된다. 따라서 이 논문에서 정기선 선박의 최적항로란 계획기간 동안 모든 화물을 최소의 비용으로 운항할 수 있는 항로를 말한다.

1. 모형의 가정

이 논문에서는 논의의 편의상 한척의 정기선 선박을 가정한다. 그러나 개발된 모형이 반드시 한 척의 선박을 소유한 정기선사에만 적용될 수 있는 것은 아니다. 여러 척의 선박을 보유한 선사에서 특별히 중요한 한척의 대형 선박에 대한 항로결정이나, 여러 척의 정기선으로 구성된 특정 정기선대의 항로결정에도 활용될 수 있는 모형이다. 항로 결정을 위한 계획기간을 편의상 1년으로 가정하고, 연간 화물 수요에 대해서는 중요 물류거점들 간의 화물흐름에 대한 예측치가 확정적으로 주어졌다고 가정한다. 또한 정기선 항로는 중심항만들로만 구성되고 중심항만과 주변항만 사이의 운송은 이미 계획된 방법이 있다고 가정한다.

2. 모형의 기호

본 연구에서는 다음과 같은 기호, 의사결정 변수 및 계수들을 사용하였다.

[기 호]

i 또는 j : 네트워크(network)의 각 마디(node)를 나타내며 이 논문에서 각 마디는 각 항만을 의미한다.

(i, j) : 마디 i 에서 j 까지의 가지(arc)를 의미한다. 가지 (i, j) 의 존재는 마디 i 에서 마디 j 로 직항로가 개설되어 있음을 의미한다.

J : 후보 중심항만(candidate hub ports)들의 집합이다.

k : 공급지에서 수요지로의 개별 화물흐름을 나타낸다.

$\alpha(k)$: 개별 화물흐름 k 의 공급지를 나타낸다.

$\alpha(k)$: 개별 화물흐름 k 의 수요지를 나타낸다.

A : 모든 가지들의 집합을 표시한다.

N : 후보 중심항만들을 포함하여($J \subset N$) 관련된 모든 항만(마디)들의 집합을 표시한다.

K : 모든 화물흐름의 집합을 나타낸다($k \in K$).

$|K|$: 집합 K 의 원소의 수를 나타낸다. 즉, $|K|$ 는 화물흐름의 수, $|M|$ 는 후보 중심항만의 수를 의미한다.

[의사결정 변수]

x_{ij}^k : 항만 i 에서 j 간 화물 k 의 운송량, $0 \leq x_{ij}^k \leq 1$, 비율로서 화물 k 를 모두 운송할 경우 1, 일부만 운송할 경우 0 과 1사이의 비율을 갖는다.

z_j : 후보 중심항만 j 의 활용 여부, 즉, j 를 기항지로 선택할 것인가를 나타내는 0-1 정수변수, 활용할 경우 1, 활용하지 않을 경우 0의 값을 갖는다.

[모형의 계수]

c_{ij}^k : 연료비, 항만사용비 등을 포함하는 항만 i 에서 j 까지 화물흐름 k 를 모두 운송하는 경우 발생하는 연간 총운항비용을 의미한다.

g_j : 후보 중심항만 j 를 새롭게 기항지로 활용하게 될 경우 기항 회수에 관련 없이 연간 발생하는 고정비용⁵⁾을 의미한다.

III. 최적항로 결정 모형

이 장에서는 새로운 중심항만을 고려한 정기선의 최적항로 결정모형에 대한 최적화모형을 제안한다. 새로운 중심항만을 새로운 기항지로 활용할 수 있는 기회가 주어져 있는 선사를 대상으로 하는 의사결정모형이다. 이러한 새로운 중심항만을 기항지로 활용할 경우 기존의 항로를 활용하는 경우보다 운항비는 절감되는 반면 고정비는 증가될 것이다. 주요 화물흐름 별로 다르게 나타나는 이러한 상호관련성을 시스템적으로 고려하여 전체적 입장에서 최적 정기선 항로를 결정할 수 있는 혼합정수계획모형(mixed integer programming model)을 제시하였다.

새로운 후보 중심항만들의 활용이 이미 결정되어 있으면, 고정비가 의사결정 시 고려되지 않아도 된다. 이 경우 각 화물흐름(k)별 최적항로는 대표적 최단경로발견 해법인 다익스트라 해법(Dijkstra method)⁶⁾을 $|K|$ 번 적용하여 모두 구할 수 있다. 그러나 이 연구에서의 의사결

5) 선사별로 구체적으로 다른 비용 구조를 가질 것이지만 대체로 정기선사의 전용터미널 임대 시 연간 발생하는 임대비용 및 초기투자비용을 의미한다.

정은 새로운 중심항만을 기항지로 포함할 것인가를, 즉 새로운 중심항만들에 대한 활용여부를 포함하기 때문에 다익스트라해법만으로는 전체적인 입장에서의 최적해(global optimal solution)를 도출할 수가 없다. 이 논문에서는 이러한 의사결정의 복잡성을 모형에 반영하기 위해 의사결정 상황을 확정적 네트워크 모형 대신 혼합정수계획모형을 통해 표현하였다.

1. 목적함수(Objective function)

화물의 공급지에서 수요지까지 중심항만을 경유하여 화물을 수송해야 할 경우 목적지까지의 운항비를 최소화하기 위해 적절한 중심항만들을 기항지로 활용해야 할 것이다. 이때 만일 후보 중심항만 j 가 새로운 기항지로 활용된다면 이에 따른 초기 투자비용에 해당하는 고정비용 g_j 가 발생하게 된다. 따라서 이러한 새로운 중심항만 활용에 따르는 연간 총고정비용을 수식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\sum_j g_j z_j$$

또한 화물흐름 k 를 항만 i 에서 j 까지의 직항로 (i,j) 를 통해 운송할 경우 연간 운항비용 c_{ij}^k 가 발생하므로 모든 화물흐름을 위해 연간 발생하는 총운항비용은 아래와 같다.

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k$$

위의 두 비용으로부터 모형의 목적함수는 새로운 중심항만 활용 시 발생하는 총고정비용과 화물운송 시 발생하는 총운항비용의 합을 최소화 하는 것으로 수식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\min \sum_j g_j z_j + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

2. 제약식(Constraints)

6) 김세현, 「현대경영과학」, 서울: 무역경영사, 2001, pp. 224-227.

화물흐름 k 의 공급지를 $o(k)$, 수요지를 $d(k)$ 라 하면, k 는 각 항로 (i, j) 를 통해서 $o(k)$ 에서 $d(k)$ 로 운송된다. 각 화물의 연간 수요를 모두 1로 표준화할 경우, 임의의 항만 $i \in N$ 와 화물흐름 $k \in K$ 에 대해 (2)와 같은 네트워크 흐름 제약식을 갖게 된다.

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} 1, & i = o(k) \\ -1, & i = d(k) \\ 0, & i \text{가 화물 } k \text{의 중간 기항지인 경우} \end{cases} \quad (2)$$

화물이 후보 중심항만 j 를 경유하기 위해서는 반드시 이 후보 중심항만이 새로운 기항지로 활용되어야 한다. 임의의 후보 중심항만 $j \in J$ 와 각 화물흐름 $k \in K$ 에 대해 이러한 조건을 아래의 수식 (3)과 같은 제약식으로 표현할 수 있다.

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq z_j$$

위의 제약식의 수는 후보 중심항만 하나 당, 화물흐름의 수만큼 많게 되므로 제약식의 수를 줄이기 위해 모든 화물흐름을 동시에 고려하여 아래와 같이 표현할 수도 있으며, 이렇게 하면 제약식의 수는 각 후보 중심항만 j 당 1개로 줄일 수 있다.

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq |K| z_j \quad (3)$$

일반적으로는 이렇게 제약식의 수를 줄이면 수학적으로 더 많은 실행가능해(feasible solution)를 갖게 되지만, 여기에서는 이미 제약식 (2)에 의해 $\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k$ 가 모두 0 과 1 사이의 값만을 갖도록 통제되어 있으므로 동일한 실행가능해를 갖게 된다. 따라서 이 논문에서는 보다 제약식의 수가 줄어드는 (3)을 활용하여 모형을 제안하였다.

아래의 제약식 (4)는 자명한 제약식이지만 모형을 수식적으로 완성시키기 위해 필요하다.

$$z_j \in \{0, 1\}, x_{ij}^k \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in K \quad (4)$$

3. 완성된 혼합정수계획 모형

지금까지 논의된 목적함수와 제약식 (1)-(4)를 통하여 다음과 같이 정기선의 최적항로를 결정하는 모형을 제시할 수 있다.

【모 형】

$$\min \sum_j g_j z_j + \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k - \sum_{(j,i) \in A} x_{ji}^k = \begin{cases} 1, & i = o(k) \\ -1, & i = d(k) \\ 0, & i \text{가 화물 } k \text{의 중간 기항지인 경우} \end{cases} \quad (2)$$

$i \in N, k \in K$

$$\sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \leq |K| z_j \quad j \in J \quad (3)$$

$$z_j \in \{0, 1\}, x_{ij}^k \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in K \quad (4)$$

위 모형은 $|J|$ 개의 정수변수와, 최대 $2|K||A|$ 만큼의 연속변수를 가지는 혼합정수계획모형이다. 제약식 (2)는 $|K|$ 개의 화물흐름별로 나누어 처리할 수 있는 다루기 쉬운 네트워크 흐름 제약식이다. 반면 연속변수와 정수변수가 함께 있는 제약식 (3)은 후보중심항만의 수, 즉, $|J|$ 가 증가함에 따라 모형의 복잡성을 증가시킨다. 따라서 표준적인 정수계획 해법으로 해를 구할 경우 최적해의 도출과정이 매우 비효율적일 수도 있지만, 현실적으로 이미 정기선을 운항중인 선사의 경우 $|J|$ 는 그리 크지 않은 2-3개 정도일 것으로 예상할 수 있다.

4. 최적해의 관리적 해석

위 **【모 형】**은 현실에 적용할 경우 대부분 고려 대상인 후보 중심항만의 수가 그리 많지 않을 것이므로, 다음 장의 사례분석과 같이 표준적인 정수계획모형 소프트웨어를 활용하여 쉽게 최적해를 구할 수 있다.

x_{ij}^k 는 마디 i 에서 j 사이의 화물흐름 k 를 전체 화물량에 대한 비율로 설명하는 변수이다. 따라서 연속변수이지만 **【모 형】**의 제약식 (2)가 네트워크의 흐름 제약식이므로 제약식의

계수행렬이 TUM(totally unimodular matrices)⁷⁾이다. 따라서 실제로 최적해로 발견되는 x_{ij}^k 의 값은 는 항상 0, 혹은 1의 정수값을 갖게 된다.

최적해에서 z_j 의 값을 z_j^* 로, x_{ij}^k 의 값을 x_{ij}^{k*} 라고 해보자. 그러면 이 값들은 다음과 같은 의미를 갖게 된다.

(1) 만약 z_j^* 가 1이면 후보 중심항만 j 를 정기선 항로의 새로운 기항지로 활용하여야 함을 의미한다. 반면 $z_j^*=0$ 이면 후보 중심항만 j 는 선사의 입장에서는 경제성이 없으므로 활용하지 않는 것이 바람직하다는 것을 나타낸다.

(2) $x_{ij}^{k*}=1$ 인 가지들을 연결하면 화물흐름 k 를 연간 최소의 비용으로 운송할 수 있는 항로가 발견된다. 또한 각 화물흐름(k) 별로 발견된 최적항로들을 연결하면 중심항만들로만 구성된 정기선 선박의 최적항로가 발견될 수도 있다. 이 경우 모형에 포함된 주요 화물흐름들을 이 경로를 따라 운송하면 정기선사의 운항이익을 최대화할 수 있다. 개별 화물흐름별 최적항로를 연결하는 방법으로 정기선 항로를 완전히 구성할 수 없는 경우에도 개별 화물흐름별 최적항로는 경영자의 최종적인 정기선 항로의 결정에 도움을 줄 수 있을 것이다. 예를 들면 경영자는 전체적인 화물 운송비를 최소화하기 위해 개별 화물흐름별 최적항로가 가능한 대로 많이 포함되도록 정기선 항로를 계획할 수 있다. 물론 이 경우 최종적인 정기선 항로의 결정은 경영자의 판단에 따라 다소 차이가 날 것이다.

IV 사례분석

이 장에서는 이 논문에 제시된 의사결정 모형을 활용하여 4,000TEU급 컨테이너 선박을 가지고 있는 가상적인 선사의 정기선 최적항로 결정을 예시해보고자 한다.

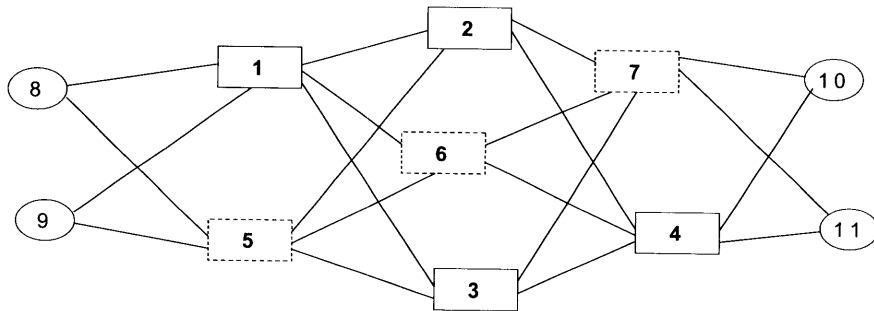
1. 문제 설명

의사결정을 하고자 하는 정기선사는 [그림 4-1] 과 같은 주요화물 흐름에 대한 공급지,

7) G. L. Nemhauser and L. A. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*, New York: John Wiley & Sons, 1988, pp. 540-546.

수요지, 중심항만, 후보 중심항만을 경유하는 최적항로를 개발하려고 한다. 그림에서 8, 9, 10, 11 마디는 공급지 마디 또는 수요지 마디이다. 1, 2, 3, 4 마디는 이미 활용중인 중심항만을 나타낸다. 그리고 5, 6, 7 마디는 새롭게 기항을 고려중인 후보 중심항만을 나타낸다.

[그림 4-1] 운송 네트워크



위 [그림 4-1]의 각 공급지에서 수요지로 화물흐름이 발생할 때, 중심항만들을 기항지로 하는 정기선의 최적항로를 결정하는 문제를 생각해 보자. 우선 네 가지의 중요한 화물흐름 ($K=\{1, 2, 3, 4\}$)이 있다고 가정해 보자. [표 4-1]은 이 네 가지의 화물흐름을 나타내고 [표 4-2]는 각 화물흐름의 동향(east bound : E/B)과 서향(west bound : W/B)으로의 화물흐름 예측치를 보여준다고 하자.

[표 4-1] 각 공급지, 수요지 마디 간 화물의 흐름

화물흐름 \ 마디	공급지 마디	수요지 마디
$k = 1$	8	11
$k = 2$	11	8
$k = 3$	9	10
$k = 4$	10	9

[표 4-2] 연간 화물흐름 예측치 (단위: TEU)⁸⁾

화물흐름	동향(E/B)	서향(W/B)
$k = 1$	75,380	40,605
$k = 2$	44,044	64,061
$k = 3$	22,195	33,018
$k = 4$	12,586	23,124

화물흐름 $k=1, 2, 3, 4$ 의 연간 화물흐름양이 [표 4-2] 와 같이 각각 다를 경우 아래의 [표 4-3~10]처럼 같은 항해구간 (i, j) 에 대해서도 연간 운항비인 C_{ij}^k 는 달라지게 된다.

[표 4-3] 화물흐름 1의 각 구간별 운항비(E/B)⁹⁾

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	51.4	77.1	-	-	19.3	-	-	-	-	-
2	-	-	-	57.9	-	-	12.9	-	-	-	-
3	-	-	-	57.9	-	-	19.3	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51.4	38.6
5	-	25.7	12.9	-	-	6.43	-	-	-	-	-
6	-	-	-	12.9	-	-	6.43	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	19.3	16.1
8	32.1	-	-	-	12.9	-	-	-	-	-	-
9	45	-	-	-	19.3	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 4-4] 화물흐름 1의 각 구간별 운항비(W/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	-	-	-	-	-	-	132	110	-	-
2	154	-	-	-	55	-	-	-	-	-	-
3	220	-	-	-	55	-	-	-	-	-	-
4	-	165	143	-	-	33	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	11	55	-	-

8) 이 자료는 한국해양수산개발원, "KMI 세계해운전망"과 "Containerization International" 각호의 현실 자료를 바탕으로 가공된 자료이다.

9) [표 4-3~10]은 Drewry Shipping Consultant, Post-Panamax: The Next Generation, August, 2001의 자료를 바탕으로 가공된 자료이다. 태평양 항로 투입을 가정하여 연간 8.7항차 기준으로 계산한 연간 운항비용이며, 단위는 만\$이다.

6	22	-	-	-	44	-	-	-	-	-	-
7	-	11	22	-	-	33	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	66	-	-	22	-	-	-	-
11	-	-	-	88	-	-	44	-	-	-	-

[표 4-5] 화물흐름 2의 각 구간별 운항비(E/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	56.3	90	135	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	-	-	101	-	-	22.5	-	-	-	-
3	-	-	-	101	-	-	33.8	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	67.5
5	-	45	22.5	-	-	11.3	-	-	-	-	-
6	-	-	-	22.5	-	-	11.3	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33.8	28.1
8	-	-	-	-	22.5	-	-	-	-	-	-
9	78.8	-	-	-	33.8	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 4-6] 화물흐름 2의 각 구간별 운항비(W/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	-	-	-	-	-	-	88	73.3	-	-
2	103	-	-	-	36.7	-	-	-	-	-	-
3	147	-	-	-	36.7	-	-	-	-	-	-
4	-	110	95.3	-	-	22	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	7.33	36.7	-	-
6	14.7	-	-	-	29.3	-	-	-	-	-	-
7	-	7.33	14.7	-	-	22	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	44	-	-	14.7	-	-	-	-
11	-	-	-	58.7	-	-	29.3	-	-	-	-

[표 4-7] 화물흐름 3의 각 구간별 운항비(E/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	180	270	-	-	67.5	-	-	-	-	-

2	-	-	-	203	-	-	45	-	-	-	-
3	-	-	-	203	-	-	67.5	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	180	135
5	-	90	45	-	-	22.5	-	-	-	-	-
6	-	-	-	45	-	-	22.5	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	67.5	56.3
8	113	-	-	-	45	-	-	-	-	-	-
9	158	-	-	-	67.5	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 4-8] 화물흐름 3의 각 구간별 운항비(W/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	-	-	-	-	-	-	176	147	-	-
2	205	-	-	-	73.3	-	-	-	-	-	-
3	293	-	-	-	73.3	-	-	-	-	-	-
4	-	220	191	-	-	44	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	14.7	73.3	-	-
6	29.3	-	-	-	58.7	-	-	-	-	-	-
7	-	14.7	29.3	-	-	44	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	88	-	-	29.3	-	-	-	-
11	-	-	-	117	-	-	58.7	-	-	-	-

[표 4-9] 화물흐름 4의 각 구간별 운항비(E/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	360	540	-	-	135	-	-	-	-	-
2	-	-	-	405	-	-	90	-	-	-	-
3	-	-	-	405	-	-	135	-	-	-	-
4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	360	270
5	-	180	90	-	-	45	-	-	-	-	-
6	-	-	-	90	-	-	45	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	135	113
8	225	-	-	-	90	-	-	-	-	-	-
9	315	-	-	-	135	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

[표 4-10] 화물흐름 4의 각 구간별 운항비(W/B)

$i \backslash j$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	-	-	-	-	-	-	-	264	220	-	-
2	308	-	-	-	110	-	-	-	-	-	-
3	440	-	-	-	110	-	-	-	-	-	-
4	-	330	286	-	-	66	-	-	-	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	22	110	-	-
6	44	-	-	-	88	-	-	-	-	-	-
7	-	22	44	-	-	66	-	-	-	-	-
8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	-	-	132	-	-	44	-	-	-	-
11	-	-	-	176	-	-	88	-	-	-	-

[표 4-11]은 [그림 4-1]에서 점선으로 나타나 있는 후보 중심항만들을 새로운 기항지로 활용할 경우 고정비용인 g_j 를 나타낸 것으로 정기선사의 전용터미널 임대 시 연간 발생하는 임대비용 및 초기투자비용 등을 포함한다.

[표 4-11] 후보 중심항만 활용 고정비용¹⁰⁾

	g_5	g_6	g_7
비용	350	500	430

2. 최적항로 결정 모형

앞 절에서 제시한 자료를 활용하면 가상 정기선사의 최적항로 결정을 위한 【모형】은 아래와 같이 정식화된다.

【모형】

$$\min \quad 350z_5 + 500z_6 + 433z_7 + 32.1x_{81}^1 + 56.3z_{81}^2 + \dots + 73.3x_{59}^3 + 110x_{59}^4$$

subject to

$$x_{81}^1 + x_{85}^1 - x_{18}^1 - x_{58}^1 = 1$$

10) 신선대 터미널 임대비용을 반영하였으며 5년간 임대비용을 연간비용으로 환산한 것이다. 단위는 만\$이다.

$$\begin{aligned}
& x_{18}^1 + x_{13}^1 + x_{16}^1 + x_{12}^1 - x_{81}^1 - x_{31}^1 - x_{61}^1 - x_{21}^1 = 0 \\
& x_{117}^1 + x_{114}^1 - x_{711}^1 - x_{411}^1 = -1 \\
& x_{117}^2 + x_{114}^2 - x_{711}^2 - x_{411}^2 = 1 \\
& \dots\dots\dots \\
& \dots\dots\dots \\
& x_{91}^4 + x_{95}^4 - x_{19}^4 - x_{59}^4 = -1 \\
& x_{85}^1 + x_{25}^1 + x_{65}^1 + x_{35}^1 \dots + x_{95}^4 + x_{25}^4 + x_{65}^4 + x_{35}^4 - 4z_5 \leq 0 \\
& x_{16}^1 + x_{56}^1 + x_{46}^1 + x_{76}^1 \dots + x_{16}^4 + x_{56}^4 + x_{46}^4 + x_{76}^4 - 4z_6 \leq 0 \\
& x_{117}^1 + x_{37}^1 + x_{67}^1 + x_{27}^1 \dots + x_{107}^4 + x_{37}^4 + x_{67}^4 + x_{27}^4 - 4z_7 \leq 0 \\
& z_j \in \{0, 1\}, x_{ij}^k \geq 0 \quad (i, j) \in A, k \in K
\end{aligned}$$

3. 최적해의 도출 및 해석

【모형】을 선형/정수계획법 소프트웨어인 LINDO/PC를 이용해 푼 결과 다음과 같은 최적해를 얻었다.

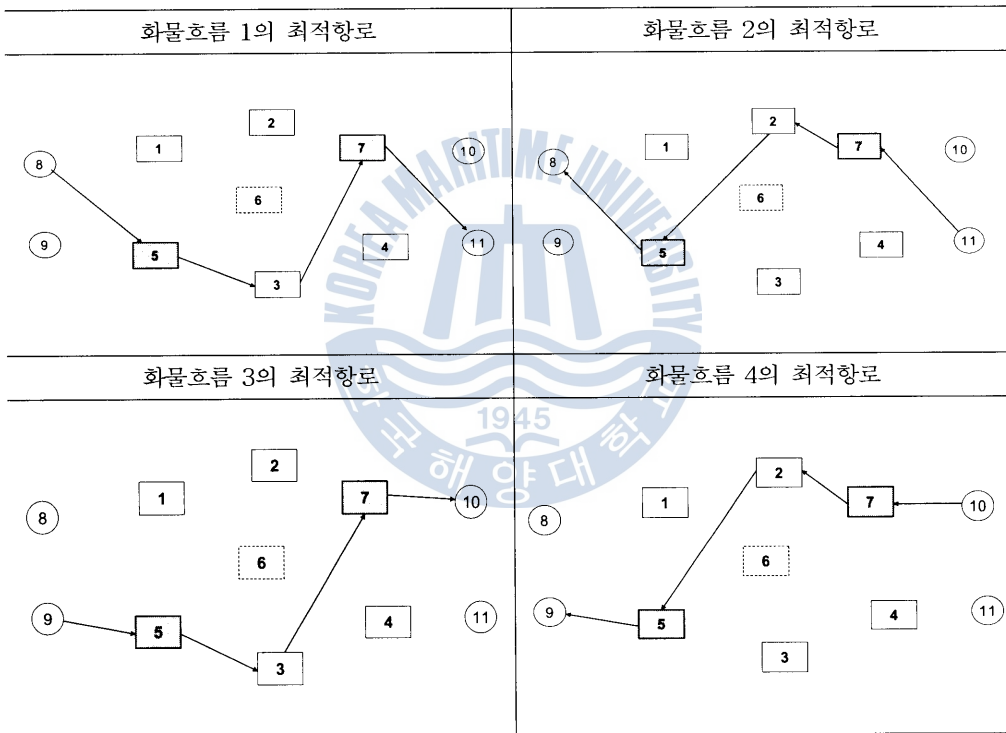
$$\begin{aligned}
& z_5^* = z_7^* = 1, z_6^* = 0 \\
& x_{85}^{1*} = x_{53}^{1*} = x_{37}^{1*} = x_{711}^{1*} = 1, x_{117}^{2*} = x_{72}^{2*} = x_{25}^{2*} = x_{58}^{2*} = 1, \\
& x_{95}^{3*} = x_{53}^{3*} = x_{37}^{3*} = x_{710}^{3*} = 1, x_{107}^{4*} = x_{72}^{4*} = x_{25}^{4*} = x_{59}^{4*} = 1
\end{aligned}$$

위 최적해를 볼 때 후보 중심항만 5, 6, 7 중 5, 7은 새로운 기항지로 활용하고, 6은 새로운 기항지로 활용하지 않는 것이 바람직하다는 결론을 얻을 수 있다. 이 경우 후보 중심항만 5와 7을 새로운 기항지로 활용하는 데에 따르는 고정비는 연간 각각 350만\$과 433만\$이다.

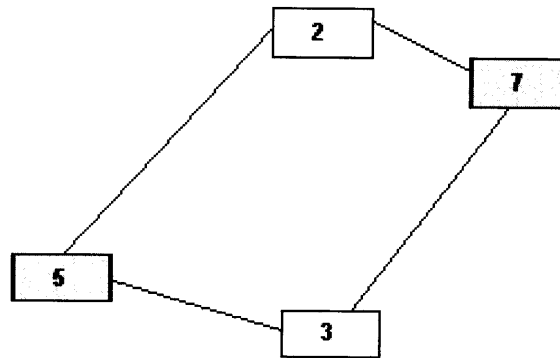
최적해 값 중 x_{ij}^{k*} 값들을 통해 각 화물흐름별 최적항로를 관찰할 수 있다. 화물흐름 1의 경우 최적해는 $x_{85}^{1*} = x_{53}^{1*} = x_{37}^{1*} = x_{711}^{1*} = 1$ 이므로, 이는 공급지인 8번 마디에서 중심항만인 5, 3, 7번 마디를 경유하고 수요지인 11번 마디로의 흐름이 1번 화물흐름의 최적항로임을 의미한다. 이 경우 연간 발생하는 최소 운항비는 $c_{85} = 45$, $c_{53} = 45$, $c_{37} = 67.5$, $c_{711} = 56.3$ 의 합인 213.8만\$이다. 이와 같은 방법으로 [그림 4-2]처럼 각 화물흐름 별 최적해의 관찰을

통해 각 화물흐름 1, 2, 3, 4의 최적항로를 발견할 수 있고, 각 화물흐름의 최소 운항비용 213.8만\$, 242만\$, 247.5만\$, 286만\$도 계산할 수 있다. 또한 [그림 4-2]의 각 화물흐름별 최적항로들을 연결하면 중심항만들의 연결로만 구성된 정기선의 최적항로를 [그림 4-3]과 같이 발견할 수 있다. 즉, 정기선사의 최적항로는 5→3→7→2→5의 순서로 기항지를 정하는 것이다. 즉, 이 논문에서 개발한 최적항로 결정 모형을 통해 선사는 새로운 후보 중심항만들 중 5와 7일 새로운 기항지로 활용하고, 이를 경유하는 항로인 5→3→7→2→5의 순서로 정기선의 항로를 계획하는 것이 최적임을 알 수 있게 된다.

[그림 4-2] 화물흐름별 최적항로



[그림 4-3] 발견된 정기선의 최적항로



V. 결 론

해상운송은 대량수송과 저렴한 운임이라는 이점으로 다른 운송수단보다 많은 물동량을 가지고 있다. 그러나 각 정기선 해운선사들은 동맹에 의한 약정된 운임을 가지고 있기 때문에 개별 선사 입장에서 운임 변동을 통한 선사 이익의 증대는 거의 불가능하다. 따라서 정기선 해운경영의 이익을 제고하기 위해서는, 효율적인 항로결정 및 운항계획을 통한 운항비 절감이 중요한 관리적 주제이다. 특히 규모의 경제를 통한 운송 이익을 극대화하기 위해 중심항만과 주변항만간의 허브-스포크 네트워크의 시스템적 재구성이 점점 더 중요한 기회가 되고 있다. 이러한 인식에서 시도된 연구를 통해 이 논문에서는 한척의 선박에 대하여 새로운 중심항만의 활용가능성을 고려해 가면서 최적항로를 발견하도록 도움을 줄 수 있는 의사결정모형을 혼합정수계획모형으로 제안하였다. 또한 이 의사결정모형을 통해 정기선사는 새로운 중심항만들로의 진출 여부를 결정하고, 또한 중심항만들만으로 구성된 새로운 최적항로를 발견할 수 있음을 현실자료를 바탕으로 고안된 가상적인 선사를 대상으로 예시하였다.

본 연구의 향후 연구 과제로 아래와 같은 주제들을 언급할 수 있겠다.

첫째로, 현실적으로는 후보 중심항만의 수가 표준적 해법의 적용이 어려울 정도로 매우 많아지는 경우는 상상하기 어렵다. 그러나 이론적으로는 개발된 모형이 매우 많은 정수 변수를 수반하게 될 경우 표준해법으로 최적해를 구하는 것이 어려운 경우를 상상할 수 있다. 이 경우 상용화된 해법의 적용 보다는, 적절한 탐색적 해법의 개발을 시도해 볼만한 것이다.

둘째로, 본 연구의 입력 자료인 정기선사의 운항비, 터미널 임대비용, 주요 화물흐름에 대한 예측치 등은 현실적으로 각 선사의 데이터베이스(database)를 통해 얻을 수 있을 것이다.

따라서 이러한 선사의 데이터베이스와 유기적으로 통합된, 최적화 모형을 기반으로 하는 사용자 중심의 의사결정지원시스템(DSS: decision support system)의 개발을 보다 종합적인 향 후 연구과제로 시도해 볼 수 있을 것이다.

또한 이 논문에서는 중심항만과 주변항만을 연결하는 방법에 대해서는 이미 결정된 수송방법이 있다고 가정하여 모형을 단순화 시켰다. 그러나 중심항만과 주변항만과의 연결방법을 결정하는 것을 포함하는 더욱 포괄적인 허브-스포크 네트워크 설계를 위한 의사결정 모형 개발을 시도해 볼 수 있을 것이다. 이러한 모형은 매우 많은 정수변수를 수반하는 보다 복잡한 수리계획모형이 될 것 이므로 모형의 개발과 함께 최적해 발견을 위한 해법의 연구도 병행되어야 할 것이다.



참고문헌

- 김세현, 『현대경영과학』, 서울: 무역경영사, 2001.
- Cahn, R. S, *Wide Area Network Design: Concepts and Tools for Optimization*, San Francisco, Morgan Kaufmann Publishers, 1998.
- Nemhauser, G. L. and L. A. Wolsey, *Integer and Combinatorial Optimization*, New York: John Wiley & Sons, 1988.
- Hsu, C.-I. and Y.-P. Hsieh, Routing, ship size, and sailing frequency decision-making for a maritime hub-and-spoke container network, *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 45, 2007, pp. 899-916 (*to appear*).
- O'Kelly, M. E., A quadratic integer program for the location of interacting hub facilities, *European Journal of Operational Research*, vol. 32, 1987, pp. 393-404.
- Sasaki, M., A. Suzuki and Z. Drezner, On the selection of hub airports for an airline hub-and-spoke system, *Computers & Operations Research*, vol. 26, 1999, pp. 1411-1422.

