Journal of Korea Port Economic Association, Vol.29, No.3, 2013, 159-174.

휴리스틱 회귀모델을 이용한 특정항만 조건하에서의 선형별 적정 항차배분에 관한 연구†

- 포항제철(주) 전용항만 사례를 중심으로-

김원재*

A Heuristic Model for Appropriation of Voyage Allocation under Specific Port Condition Using Regression Analyses - With a Case Analysis on POSCO-owned Port -

Weonjae Kim

Abstract : This paper mainly deals with the appropriation of ship voyage allocation, using a heuristic regression model, in order to reduce total costs incurred in port, yard and at sea under the specific port condition. Because of different behavior of costs incurred in port, yard and at sea, an effort to minimize these costs by adjusting the number of voyages for three ship classes(50,000, 100,000, and 150,000-ton) should be made. For instance, if the port managers attempt to reduce the sea transport cost by increasing the annual allocated number of ship voyages classed 150,000-ton for economies of scale, they have no choice but to suffer a significant increase in queueing cost due to port congestion. To put it differently, there are trade-off relationships among the costs incurred in port, yard, and at sea. We utilized a computer simulation result to perform a couple of regression analyses in order to figure out the appropriate range of allocated number of voyages of each ship class using a heuristic approach. The detailed analytical results will be shown at the main paper. We also suggested a net present value(NPV) model to make a proper investment decision for an additional berth of 200,000-ton class that alleviates port congestion and reduces transport cost incurred both in port and at sea.

Key Words : Heuristic Regression Model, Ship Voyage Allocation, Simulation Result, Investment Decision, Transport Cost

---

▷ 논문접수: 2013.05.15 ▷ 심사완료: 2013.09.23 ▷ 게재확정: 2013.09.27

† 본 논문은 인천국립대학교 교내연구비 지원에 의해 수행된 연구결과입니다.

* 인천국립대학교 무역학부 교수, kwj5502@incheon.ac.kr, 032)835-8541

한국항만경제학회지 2013 제29권 제3호, 159-174.

Ⅰ. 서 론

우리나라의 해안 사용 용도를 보면 양식업 및 어업활동을 위한 목적, 그리고 해양관광지 등으로 전체해안의 약 65% 가량을 사용하고 있으며, 나머지 30% 정도는 수출입 및 여객수송을 위한 항만시설, 그리고 나머지 5% 정도가 특정기업이나 국가 산업단지 등이 전용항만을 조성하여 사용하고 있다. 이러한 독립적 전용항만을 조성하고 선사와의 장기계약을 통해 항만을 독점적으로 사용하는 사례가 점차 증가하고 있는 추세이다. 예를 들면, 울산의 현대자동차 전용부두, 포항의 포항제철 전용부두, 여천의 에너지화학공업단지 전용부두, 그리고 영흥의 한전 화력발전소 전용부두 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 과거 포항제철이 전용으로 운용한 원료부두의 사례를 이용하여 주어진 특정 항만 구조 하에서 발생되는 총 물류비용을 최소화 할 수 있는 의사결정 모델을 휴리스틱(heuristic)적 회귀분석 기법을 통해 제시해 보고자 한다.

현재 경기침체와 금융위기 등으로 적지 않은 우리나라 기업들이 치열한 국제 경쟁환경 속에서 수익감소는 물론 막대한 비용 증가로 인해 그 존립이 위협받고 있는 상황이다. 이러한 당면과제 중 하나가 물류비용 관리 문제이다. 특히 국가경제를 수출입에 상당부분 의존하고 있는 우리나라로서는 해운물류비용, 항만물류비용, 그리고 육상물류비용 등에 대한 관리의사결정 문제가 대단히 중요하다. 2009년도 기준하여 우리나라 기업의 물류비 비중은 총비용의 9.3%를 차지하는 것으로 조사되었는데, 이는 일본 기업의 4.9%에 비해 거의 두배 정도 높은 수준으로서 물류체계가 효율적이지 못한 것을 반영한다. 따라서 우리나라 기업들의 국제 경쟁력을 높이기 위해서는 물류체계의 효율화를 통한 물류비용 절감 방안이 매우 중요하다.

일반적으로 물류비용이라 함은 화물의 운송, 보관, 보험 등과 관련하여 발생되는 모든 비용을 총괄하는 개념이나, 본 논문에서는 특정기업이 전용항만을 운용함에 따라 발생되는 해상수송비(sea transport cost), 항만사용에 따라 발생되는 재항비용(cost in port), 항만배후 지역에서 발생되는 재고비용(inventory cost in yard) 등으로 국한하기로 한다. 이러한 물류비용들은 주어진 항만조건하에서 그 비용발생 행태가 서로 상충적인 특성을 가진다. 환언하면, 해상수송비를 절감하기 위해 대형 선박 이용 빈도를 어느 수준 이상으로 올릴 경우 규모의 경제 효과(economies of scale)로 단위당 해상 수송비는 절감되나 일단 항만에 도착하여 대형선박이 접안할 수 있는 선석이 없어 대기할 경우 대기비용이 급격히 상승하게 되어 규모의 경제 효과를 모두 상쇄시키는 결과를 가져오게 된다. 그리고 원재료를 사용하지 않고 야드에 오랫동안 보관하게 되어 재고비용의 증가도 초래하게 된다. 따라서 원료수입 등과 같은 물류관리상 총 물류비용을 최소화 할 수 있도록 연간 물동량을 감안하여 주어진 선석별(또는 선형별)로 연간발주 수

를 조절하여 결정해야 하는 과제 해결이 요구된다.

그러나 현실적으로 전용항만을 이용하는 과정에서 갑자기 특정 원료가 필요한 경우, 선박이 항만에 도착하고 접안하여 작업 중 다른 대형 선박의 도착 등으로 작업이 완료되지 않은 상태에서 소형 또는 중형 선박이 접안할 수 있는 선석으로 이동(shift)시키는 사례 등이 빈번한 만큼, 이러한 추가적인 상황을 반영하고 선박 도착 간 시간(inter-arrival time) 등을 감안하여 시뮬레이션 기법을 이용한 선행연구 자료를 활용하고자 한다[1]. 즉 포항제철 원료수입 전용부두를 운용하는데 따른 총 물류비용과 각 선형별(5만톤급, 10만톤급 및 15만톤급)로 배정된 연간 항차수 간에 어떠한 함수관계가 있는 지를 파악해 보기위해 휴리스틱 접근방법에 따른 회귀 모형을 사용하여 선형별 최적 연간 항차배정수를 추정해 보고자 한다. 이러한 회귀분석 결과는 대형선박의 접안이 가능한 추가선석 건설 투자의사결정에도 매우 유용하다. 즉 현재시점의 추가선석 건설 투자비용과 건설 이후 새로운 전용항만의 구조하에서 매년 절감되는 대기비용 및 해상수송비용을 비교하여 어느 시점에서 선석 추가를 위한 투자의사결정을 내리는 것이 합리적인지를 가늠할수 있는 순현재가치 모델(NPV model)도 제시해 보고자 한다. 제 2장에서는 휴리스틱 회귀모델을 이용한 전용항만 구조하에서 선석 또는 선형별 연간 투입 항차수 의사결정을 위한 사례분석 결과, 제 3장에서는 전용항만 추가건설을 위한 투자의사결정 모델, 그리고 제 4장에서는 결론 및 논문의 한계 등을 다루고자 한다.

Ⅱ. 기존연구 검토 및 휴리스틱 회귀모델 설정

1) 기존 연구의 검토

본 논문의 핵심 의사결정 문제는 정해진 항만구조하에서 연간 요구되는 원자재 등 화물을 해상 수송하는 경우 발생되는 관련 물류비용, 즉 해상수송비용, 선석대기비용, 그리고 야적지에서 발생되는 재고비용 등의 합을 최소화 할수 있는 선박 톤급별 연간 항차배정이 최적으로 하는 문제라고 볼 수 있다. 하지만 이들 각각의 비용발생 함수는 서로 다른 특성을 보인다.

예를 들면, 해상수송비는 투입 선박톤수가 커질수록 규모의 경제효과로 인해 단위당 운임은 하락하므로 가급적 대형선박으로 수송하는 것이 유리하다. 그러나 이러한 의사

1) Weon Jae Kim, "Optimizing Total Transport Cost Incurred under Specific Port System: With a Case of Managing POSCO-owned Berths", Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 26(3), 2010, 42-55.

결정은 대형선박이 접안할 수 있는 선석의 부족으로 인해 어느 시점에서 선석 대기비용이 급격히 상승하는 결과를 가져오게 된다. 그리고 대형선박에서 하역된 원자재가 배후지에 오랫동안 저장되는 관계로 재고관리비용도 다소간 상승하게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 항만 대기모형을 가정한 시뮬레이션모델을 통해 최적해를 얻어 보고자 하는 연구가 김원재(2010)에 의해 시도된 바 있다. 또한 이진우(2010)는 항만의 리모델링사업 경제성 분석 연구에서 항만대기비용 절감요소를 중요한 분석 대상으로 한 바 있다. Notteboom(2010), Brooks(2006) 등은 유럽항만의 사유화(privatization) 추세에 대한 연구를 통해 전용항만의 효율성 문제를 다루었고, El-Nagger(2010)는 이집트 알렉산드리아 컨테이너 신항만 조성시 적정 선석수를 결정하기 위한 예비타당성 조사에서 대기모델 이론을 사용한 바 있다. 그리고 Lai(1996) 등은 대만 전력공사가 해외에서 석탄을 수입하는 물류비용을 최소화하기 위한 전략적 수리모형을 제시하기 위해 선형 모델과 확률적 모델을 동시에 이용한 사례가 있다. Yu(2000) 등도 항공 물류비용관리에 있어 비용 최소화를 위한 의사결정 문제를 해결하기 위해 확률적 모델과 확정적 모델의 혼합을 시도한 바 있다. 그밖에 Musso(2006) 등은 사례연구를 통한 항만 투자 의사결정 문제를 다루었다.

한편 본 논문에서는 해상수송비용, 선석대기비용, 그리고 야적지 재고비용 등이 앞서 언급된 3가지 선형별 항차배정수와 어떠한 함수관계를 갖는다고 가정하여 그 관계를 회귀분석(regression analysis) 기법으로 규명하고자 하는 만큼 통계적으로 신뢰도가 보다 높은 함수관계를 찾기 위해 휴리스틱 기법(heuristic technique)을 이용하고자 한다. 이러한 선행연구로서 Abdulah(2006)는 자신의 학위논문으로서 대학의 강의실 이용율을 높이기 위해 개설되는 강의 과목 수와 사용가능한 강의실 간의 상관관계를 분석하는데 휴리스틱 모델을 사용한 바 있다. 또한 Estrada(2007)는 일본과 미국 주식시장에 분산투자할 경우의 투자수익성을 극대화 할 수 있는 투자비율을 찾는 문제를 다루며 휴리스틱 기법을 사용한 바 있다. 결국 휴리스틱 모델은 시행착오를 거치며 모든 상황에서 최선책을 찾는 문제에 광범위하게 적용될 수 있는 기법이다.

2) 모델의 설정

일단 독립적 항만을 운영함에 따라 발생되는 모든 물류비용, 즉 해상수송비용, 항만내 선석대기비용, 그리고 야드 적재에 따른 재고비용 등은 선박 톤수별 연간 항차 배정수와 관련이 있다고 가정하였다. 발생비용(C)이 독립변수이고 5만톤급 배정항차수를 X1, 10만톤급 배정항차수를 X2, 15만톤급 배정항차수를 X3 로 하여 이들을 종속변수로 보았다. 다만 해상수송비 추정의 경우는 선박톤수가 커질수록 단위당 수송비가 체감하는 규모의 경제효과가 있는 지를 알아 보고자 하였고, 항만대기비용의 추정은 대기모형

을 전제로 한 시뮬레이션 결과가 현실을 잘 반영할 수 있다고 본다. 즉 비용의 발생이 비선형적인 만큼 이를 함수로써 추정해 본다면 최소한 다항 일차함수로는 추정이 불가한 것이다. 따라서 항만대기비용 추정 모델은 다항 다차식을 가정하였다. 그밖에 야드 재고비용 추정은 대형선박의 연간 항차배정이 커질 경우 상승하고 소형선박 연간항차 배정이 커질 경우는 하락하는 것이 일반적인 만큼 다항식을 가정하여 모델을 설정 하였다. 이러한 가설을 요약하여 하나의 함수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$Ci = f(xj) \quad \text{----------} \quad (II\text{-}1)$$

함수식 (II-1)에서 종속변수 Ci 는 해상수송비, 선석대기비용, 야드 재고비용, 그리고 총 물류비용 등을 나타내며, 독립변수 Xj 는 각 선형별 연간 배정 항차수를 의미한다. 즉 X1, X2, X3 는 각각 15만톤급, 10만톤급, 5만톤급 연간 배정항차수를 의미한다. 다만 각 물류비용 발생 행태가 다른 만큼, 종속변수는 휴리스틱 이론에 근거하여 다양하게 설정될 수 있다고 보았다. 즉 X1X2, X2X3, X1X3 와 같은 변수도 고려될 수 있고 X12, X22, X32 등 다차식 모델도 반영시켜 회귀분석한 결과를 다음 장에서 구체적으로 설명하고자 한다.

III. 전용항만 구조하에서의 선형별 연간항차 배정 의사결정을 위한 휴리스틱 회귀분석 결과

회귀모델을 이용한 총 물류비용을 최소화하는 선형별 연간배정 항차수 의사결정의 타당성을 보여주기 위해 포항제철(주)의 전용원료항만을 대상으로 사례 분석해 보고자 한다. 주로 철강제품을 생산하는 포항제철(주)는 호주로부터 철광석과 제련용 석탄을 수입하고 있다. 이러한 전용항만은 지난 2004년 현재 5만톤급 선박이 접안할 수 있는 선석(berth) 1개, 10만톤급 선박이 접안할 수 있는 선석 2개, 15만톤급 선박이 접안할 수 있는 선석 1개 등으로 구성되어 있었다. 그리고 연간 원재료 수입량이 계약에 의거 결정되어 있는 만큼, 이를 수송하기 위한 선형별 항차수의 조합을 결정해야 하는 것이 관련비용을 최소화하기 위한 핵심 의사결정 과제가 된다.

<부록 1>은 선형별 항차 수 25개 조합에 대한 시뮬레이션 결과로서 해상수송비용, 항만대기비용, 야적장 재고비용 등을 보여준다.[2] 여기서 해상수송비용은 선형별 톤당 운

2) Weon Jae Kim, "Optimizing Total Transport Cost Incurred under Specific Port System: With a Case of Managing POSCO-owned Berths", Journal of Korea Port Economic Association, Vol. 26(3), 2010, 42-55

임을 근거로 계산될 수 있으며 재고비용도 재고수준에 따라 어느 정도 확정적으로 결정된다고 가정 할 수 있다. 그러나 항만대기비용 만큼은 U자형 곡선으로 추정되는 만큼 시뮬레이션 기법이나 다차식을 이용한 회귀 방정식을 휴리스틱 기법으로 모델화 해 보았다. 이러한 비용추정 가설의 타당성을 검증하기 위해 해상수송비, 재항비용, 그리고 야드 재고비용 등 각각에 대한 통계적 비용함수 추정 결과를 보기로 한다.

1. 해상수송비용 함수추정 모델 및 추정결과

전용항만 구조 하에서 발생되는 해상수송비용을 추정하기 위해서는 두 가지 가정이 필요하다. 첫째, 선형별 화물적재량이 선박톤수와 같다고 보는 가정이다. 운임이 적재화물톤수로 결정되는 만큼 실제로는 적재톤수의 90% 정도만 화물 적재량이 되나 이러한 차이를 무시하고 톤급별 그대로 운임계산 기준으로 하였다. 둘째, 항로별 톤급별로 다소 차이가 날수 있으나 톤당 운임이 연간계약 기준으로 불변한다는 가정이다. 이러한 가정 하에 해상운송비용 추정모델은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_s = f(X_i) \quad (i = 15만톤, 10만톤, 5만톤) \quad \cdots \quad (\text{III} - 1)$$

여기서 C_s : 해상수송비용
X_i : i 선형의 연간 배정 항차수

모델 (III - 1)에서 15만톤급 선박의 총 해상수송비는 5만톤급이나 10만톤급에 비해 절대적으로는 증가되나 단위당 운임은 선박이 대형화 될수록 규모의 경제효과(economies of scale effect)에 의해 오히려 감소된다고 볼 수 있다. 이러한 가설을 단계회귀분석방법(stepwise regression method)으로 분석해본 결과는 식(III-2)와 같다.

$$C_s = 19692 + 925X_1 + 798X_2 + 662X_3 \quad \cdots(\text{III} - 2)$$
$$(0.78) \quad (5.24)^{**} \quad (4.27)^{**} \quad (8.96)^{**}$$

$d.f.$ 11 R^2 0.968 F 5022.1

* 괄호안의 수치는 t-value를 의미하며 **은 1% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미함

식(III-2)가 뜻하는 것은 해상운송비용과 선형별 투입항차수 간에는 선형함수관계가 있

으며, 가설대로 대형선박의 추가 투입은 절대 수송비용을 증가시키나, 톤당 운임비용을 감소시킨다는 것이다. 즉 15만톤 급은 항차당 US$ 92.5만(톤당 US$6.17), 10만톤 급은 US$ 79.8만(톤당 US$7.98), 그리고 5만톤급은 US$ 66.2만(톤당 US$13.24) 등으로 규모의 경제가 존재함을 알 수 있다. 따라서 주어진 독립항만을 운영하는데 있어 해상수송비 절감만을 고려한다면 운영자는 가능하면 소형선박보다는 대형선박을 투입하여 화물을 수송하는 것이 비용을 절감할 수 있는 의사결정임을 알 수 있다. 그러나 이러한 의사결정은 주어진 항만구조 하에서 또 다른 문제를 야기 시키는 데, 그것은 대형선박을 수용할 수 있는 선석의 부족으로 항만대기비용을 증가시킨다는 점이다. 즉 해상수송비용과 항만대기비용 간에는 상호 대체효과(trade-off effect)가 존재하며, 이에 따라 선형별 연간 투입항차수를 적절하게 조정하는 것이 요구된다.

2. 항만대기비용 함수추정

일단 선박이 전용항만에 도착하게 되면 선형에 따라 선석을 배정받아 접안 준비를 하게 되는데, 만약 즉시 접안할 수 있는 선석이 없을 경우는 외항에서 대기하는 것이 불가피하게 된다. 이때 대기가 장기화되면 그에 따른 항만 대기비용을 지불해야 하는 만큼 총 물류비용을 절감하기 위해서 반드시 고려해야 하는 조건이 된다.

항만대기비용 추정모델은 해상수송비용이나 재고비용과는 달리 확률적 모델(stochastic model)이 보다 타당성을 갖는다. 그것은 항만의 선석별로 선박이 도착하여 서비스를 기다리는 형태로 이해할 수 있기 때문이다. 즉 선석이 1개일 경우는 M/M/1 모델로써, 선석이 2개일 경우는 M/M/2 모델로써 대기모델화 할 수 있다. 이러한 대기모델에 의거 많은 시뮬레이션을 실시한 결과중 하나가 <부록 1>인 것이다. 여기서 초기에 연간 총 항차수가 적은 경우란 소형선형 보다 대형선형에 항차를 많이 배정했다는 것을 의미한다. 이 경우 해상수송비는 절감되나 대기비용이 상대적으로 많이 발생하게 되어 총 물류비용은 최소화되지 않을 수도 있다. 따라서 이에 대한 조정과정이 필요하다.

이론적으로 선박의 도착 및 출항시간, 하역시간, 대기시간 등은 확정적이 아닌 확률적으로 발생하기 때문에 반드시 대기비용이 일률적으로 증감하지 않게 된다. 보통 선박대기 및 도착 간 시간의 확률분포는 포아슨 분포(poison distribution)를 따르는 것으로 가정한다. 이러한 확률모델로써 추정된 항만대기비용과 선형별 연간 배정항차수간에 어떠한 함수관계가 있는 지를 단계별 회귀모델로써 분석한 결과는 다음과 같다.

기본모델은 식(II-1)과 같으나 비용발생행태가 비선형이므로 추정함수가 다차식인 것으로 가정하였다. 설명변수를 여러 가지로 조합하여 검증해 본 결과 다음과 같이 두 가

지 추정식이 통계적 유의성을 갖는 것으로 나타났다.

$$C_{q1} = -70395 + 993X_1 + 254X_3^2 \cdots (III-3)$$
$$(-3.25)^{**} \quad (4.33)^{**} \quad (12.93)^{**}$$
$$d.f.\ 12 \qquad R^2\ .972 \qquad F\ 602.17$$

$$C_{q2} = 18345 - 2.3X_1X_3 + 2.05X_3^2 \cdots (III-4)$$
$$(3.95)^{**} \quad (-2.21)^{*} \quad (8.48)^{**}$$
$$d.f.\ 12 \qquad R^2\ .959 \qquad F\ 194.63$$

* 괄호안의 수치는 t-value를 의미하며 **은 1% 수준에서, *은 5% 수준에서 통계적으로 유의함을 의미함(이하 동등)

식(III-3)에서 선박의 항만대기비용의 발생이 대형 및 소형선박의 연간 배정 항차수에 의해 설명될 수 있음을 보여준다. 그런데 대형 선박 항차수 X_1의 증가는 대기비용을 선형적으로 증가시키는 반면, 소형 선박 항차수 X_3의 증가는 대기비용을 지수적으로 증가시키는 결과이다. 하지만 추정 매개변수들로 볼 때, 어느 정도는 소형 선박에도 항차를 배정하는 것이 대기비용 최소화에 기여할 것으로 판단된다. 이 문제에 대한 보다 이론적인 답을 위해 식(III-4)를 살펴보고자 한다.

식(III-4) 역시 X_1과 X_3의 함수식으로서 이들 항차 배정에 따라 항만대기비용이 증감함을 알 수 있다. 다만 X_1 변수대신 함수 간 상호작용을 반영하는 X_1X_3변수가 유의한 것이 특징이다. 그리고 X_3의 변수가 2차원이고 양의 부호를 갖는 데 반해, X_1X_3는 일차원이며 음의 부호를 갖는 것으로 나타났다. 직관적으로 볼 때, 소형 선박 항차수인 X_3를 감소시키고 대형선박 항차수인 X_1을 증가시킬 경우 총 항만대기비용이 일정수준까지 감소됨을 알 수 있다.

$$\frac{2C_{q2}}{2X_3} = -2.3X_1 + 4.1X_3 = 0$$

$$\therefore X_1 = 1.78X_3 \qquad \cdots (III-5)$$

또한 식(III - 4)를 X_3에 대해 미분하게 되면 식(III - 5)와 같이 되는 데, 이는 전용항만 구조 하에서 선박들의 대기비용을 최소화하기 위한 조건으로서 15만톤급 대형선박의 항차배정을 5만톤급 소형선박 항차수보다 약 1.78 배 정도 많게 해야 함을 의미한

다.

3. 항만 내 야적장 재고비용 함수추정

일단 선박이 선석에 접안하게 되면 화물 하역작업이 이루어지는 데, 포항제철(주)의 경우 석탄과 철광석으로서 주로 콘베이어벨트에 의해 선박으로부터 야적장으로 옮겨지게 된다. 따라서 선박이 도착할 때 마다 야적장의 재고는 증가하게 되고 사용하게 되면 재고는 감소하게 되는 재고시스템으로 이해할 수 있다. 재고비용이라 함은 평균적으로 야적장에 존치하는 재고량에 수입단가를 곱하여 그에 따른 이자비용이 가장 큰 몫을 차지한다. 그리고 손망실과 질의 변화 등에 따른 제비용을 포함한 개념이다. 이러한 재고비용은 안전재고량(safety stock)을 감안한 적정재고량을 유지함으로써 최소화 할 수 있다. 만약 재고량이 완전 고갈됨으로써 발생되는 비용이 천문학적이라면 다소 재고량을 높게 유지하게 된다.

하지만 수출입 계약이 확실하게 이행된다는 전제조건으로 볼때 이러한 재고비용은 선박이 원료를 적재하고 지속적으로 항만에 도착한다는 가정이 가능하다. 따라서 야적장의 재고비용 발생 역시 선형별 항차수 배정에 의해 결정된다. 이러한 재고비용 발생 행태를 파악해 보기위해 앞서 해상 수송비용 추정 및 항만대기비용추정과 동일한 모델로써 단계별 회귀분석기법을 사용 한 바, 다음과 같은 3원 1차식이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다.

$$C_y = 33492 - 0.509 X_2 X_3 + 114.8 X_1 \qquad \cdots(\text{III} - 6)$$
$$(12.81)^{**} \quad (-7.54)^{**} \quad (4.85)^{**}$$

$$d.f. = 12 \qquad R^2 \ .982 \qquad F \ \ 1409.1$$

식(III-6)에서 알 수 있는 것은 대형 선박의 배정항차수를 증가시키면 재고비용이 상승하며, 중소형 선박의 배정항차수를 증가시키면 재고비용이 감소한다는 사실이다. 즉 대형선박의 경우 1회에 많은 원료량을 적재하고 하역하게 됨에 따라 단위당 해상수송비는 절감되나, 상대적으로 평균재고수준이 높아져 야적장 재고비용은 상승함을 의미한다. 반면에 중소형 선박의 경우는 그 반대가 되어 단위당 해상수송비가 높은 대신에 야적장의 평균재고수준은 낮아져 재고비용도 적게 발생하게 된다.

그러나 총 비용의 최소화라는 측면에서 보면, 해상수송비가 전체의 약 50-80%를 차지하고 항만대기비용이 약 10-40%, 야적장 재고비용이 약 5-15% 정도의 비중이므로 해상수송비용의 절감이 총 물류비용을 최소화 하는데 상대적으로 중요한 요인임을 알 수 있다. 따라서 휴리스틱적으로 볼 때, 주어진 전용항만을 사용하는데 있어 단위당 해

상수송비를 낮추기 위해 선형을 대형화 하는 것이 유리한 만큼, 중대형 선박의 배정 항차수를 높이는 것이 타당한 의사결정임을 의미한다.

4. 총 물류비용 함수추정

본 논문에서 총 물류비용이라 함은 해상수송비용, 항만대기비용, 그리고 야적장 재고비용 등으로 구성된다. 이러한 총 물류비용이 선형별 배정항차수와 어떠한 함수관계가 있는 지를 파악한 결과는 식(III-7) 및 식(III-8)과 같다.

$$Ct1 = 284009 + 3.05X_3^2 + 503X_1 \quad \cdots(III-7)$$
$$(8.26)^{**} \quad (12.03)^{**} \quad (2.23)^{*}$$
d.f. 12 R^2. p81 F 1322.8

$$Ct2 = 32034 + 2.91X_3^2 - 1.37X_2X_3 \cdots(III-8)$$
$$(21.45)^{**} \quad (9.12)^{**} \quad (-2.13)^{*}$$
d.f. 12 R^2. 991 F 848.6

여러 조합의 설명변수를 이용하여 함수식을 추정해 본 결과 위의 2개식이 통계적으로 유의한 것으로 나타났다. 첫째, 식(III-7)이 의미하는 것은 X_1과 X_3의 함수식으로서 역시 소형 선박의 항차수와 대형선박의 항차수 배정이 전체 물류비용 증감에 영향을 줌을 알 수 있다. 즉 소형선에 배정된 항차수는 총 물류비용을 지수적으로 증가시키고 대형선의 경우는 선형으로 증가시킴을 알 수 있다.

한편 식(III-8)은 중형선 항차수(X_2)와 소형선 항차수(X_3) 간의 함수관계를 나타낸다. 이는 총 물류비용을 절감하기 위해서는 소형선박과 중형선박의 항차수 배정이 상대적으로 중요함을 의미한다. 즉 식(III-8)을 X_3에 대해 미분하면 다음과 같은 식(III-9)로 나타나는 데, 이는 주어진 항만구조하에서 포항제철(주)는 연간 선형별 항차수 의사결정에서 중형선 배정 항차수(X_2)를 소형선 배정 항차수(X_3)의 약 4.25 배로 하는 것이 이론적으로 타당함을 의미한다.

$$\frac{2C_{t2}}{2X_3} = 5.82X_3 - 1.37X_2 = 0$$
$$\therefore \; X_2 = 4.25 \; X_3 \qquad \cdots(III-9)$$

식 (III-5) 및 (III-9) 함수추정 결과들로 볼 때, 주어진 조건에서 총 물류비용을 최소

화 하기위해서는 선형별 항차수 배정비율을 1.78(X_1) : 4.25(X_2) : 1(X_3) 로 하는 것이 이론적으로 타당한 의사결정이라는 결론이다. 다만 확정적 모델과 확률적 모델이 혼재하는 만큼, 일종의 민감도 분석 차원에서 볼때 10% 내외의 변동 폭을 주더라도 적정의 사결정이 될 수 있다고 판단된다.

IV. 항만투자 의사결정 모델

지금까지의 전용항만 구조 하에서 물류비용을 최소화기 위한 과정을 살펴보았다. 이러한 추정 결과는 전용항만 투자의사결정에도 이용될 수 있다. 만약 포항제철(주)가 현재의 항만에 추가로 20만톤급 선박이 접안할 수 있는 선석을 추가로 건설하려는 투자안에 대한 경제성 검토를 실시한다고 할 때, 이에 대한 경제성 평가 모델은 식(IV-1)과 같다.

$$\text{NPVp} = \sum_{t=1}^{m} \frac{E(B_t)}{(1+r)^t} - I_0 \qquad \cdots \text{(IV - 1)}$$

NPVp : 항만투자에 따른 순 현재가치
Bt : 항만 추가 건설에 따른 ‘t’년도 편익
r : 할인율
I_0 : 초기 항만투자액

위의 식에서 투자(I)는 항만 내에 20만톤급 선석을 추가로 건설하는데 소요되는 액수이다. 그리고 편익(B)은 추가 선석이 조성됨에 따라 얻게 되는 이익을 말하는 데, 주로 선형이 대형화 되는 데 따른 해상운송비 절감액과 항만 내에서의 대기 비용 절감액의 합으로 나타난다. 항만투자의사결정에 영향을 주는 또 다른 요인은 할인율이다. 할인율이 낮을 수록 항만투자의 경제성은 개선되고 높을 수록 투자 당위성이 낮아진다. 결론적으로 위의 식(IV-1)이 0보다 크면 선석 추가투자안에 대한 경제성이 있다고 판정 할 수 있고 만약 0보다 적으면 경제성이 없다고 판정하여 투자안을 기각해야 한다. 포항제철(주)는 이러한 분석결과에 따라서 2007년도에 20만톤급 선석을 추가하는 투자의사결정을 내린바 있다.

V. 맺음말

본 논문에서는 크게 두 가지 문제를 다루었다. 첫째, 주어진 독립항만 구조하에서 선

석의 활용도를 최대화하기 위한 선형별 연간 투입항차수를 결정하는 문제이다. 둘째, 기존항만의 선석이용율이 포화상태에 도달하여 항만의 확장이 필요할 경우, 이에 대한 추가투자안의 경제성 여부를 판단하는 문제이다. 이들 문제에 대한 의사결정이 일단 내려지면 쉽게 번복하지 못하여 잘못된 의사결정을 내릴 경우 기회비용이 막대하게 된다. 따라서 주어진 조건하에서 선형별 연간 투입 항차수를 결정하는 문제와 추가 선석 투자안의 경제성분석 결과는 물류비용 최소화를 위한 매우 중요한 수단이다.

포항제철(주) 소유 전용부두 사용과 관련한 대형, 중형, 그리고 소형 등 선형별 연간 항차수 배정을 위한 휴리스틱적 회귀분석 결과를 근거로 연간 총항차수가 300항차라고 가정하면, 도출된 항차 배정비율을 근거로 볼 때 15만톤 급은 연간 약 76항차(25.3%) 내외, 10만톤 급은 연간 약 181(60.5%)항차 내외, 그리고 5만톤급 소형은 연간 약 43항차(14.2%) 내외로 배정하는 것이 물류비용을 보다 절감 할 수 있겠다. 즉 통계분석 결과 중대형선인 X_1과 X_2의 연간 배정항차수가 소형선인 X_3의 연간 배정항차수 보다 상대적으로 큰 것이 물류비용을 최소화 할 수 있는 중요한 조건임이 증명되었다. 그리고 대형선 접안 선석이 1석인 반면 중형선 접안선석이 2석인 만큼 선석대기비용 발생을 줄이기 위해서는 중형선 배정비율이 높아야 한다는 가설도 만족된 것으로 나타났다. 한편, 항만투자의사결정에 있어서도 항만 건설을 위한 초기투자비용과 추가 대형 선석을 조성함에 따른 연간 비용절감액을 할인하여 합산한 편익을 비교하여 투자액이 큰 경우는 항만투자안을 기각해야 하고 편익이 큰 경우 항만투자안을 승인하는 의사결정이 필요하다.

논문의 한계로서 항만조건의 변화, 원료수입국의 다변화, 해운 및 조선 시황 변동, 국제경제 동향 등을 고려한 종합적 의사결정 모델이 구축되어야 한다고 판단된다. 예를 들면, 최근 국제무역 동향이 미주나 유럽 중심에서 중국을 중심으로 한 아시아 권역이 확대되고 있는 바, 이러한 상황에서는 무조건 선박을 대형화 하는 것이 물류비용 절감에 도움이 되지는 않는다. 즉, 중국 등 해상수송 항해 거리가 짧은 경우 해상수송비용의 비중이 대폭 낮아져 소형 선박의 연간배정 항차수를 상대적으로 증가시키는 것이 총 물류비용을 최소화하는 방안이 될 수도 있다.

또한 포항제철(주)는 물류비용 절감 차원에서 지난 2007년도에 20만톤급 선박이 접안할 수 있는 1개 선석을 추가하여 전용항만을 운영하고 있는 만큼, 추후 이러한 변화를 반영한 연구가 필요하다고 본다. 단, 운임 및 항만대기비용 등은 선사별 장기용선 계약(COA)으로 인해 매년 변화폭이 크지 않은 만큼 연간항차배정 의사결정에 큰 영향을 주지는 못한다.

<부록 1> 시뮬레이션에 의한 선형 및 배정항차수별 비용추정결과

(단위 : 백만달러)

총항차수	(1)	(2)	(3)	해상 수송비	항만 대기비용	재고 비용	총 물류비	선석 이동	선석 대기
242	140	83	19	242.9	53.1	54.5	350.5	48	42
248	132	88	28	243.6	52.6	53.4	349.6	44	40
255	124	102	29	248.3	50.5	48.9	347.7	37	27
260	102	140	18	255.1	18.5	48.2	321.8	30	16
264	104	138	26	258.1	20.4	47.9	326.4	34	12
270	100	136	34	259.6	15.8	47.2	322.6	30	10
278	92	139	47	263.4	18.8	46.8	329.0	28	11
285	93	142	50	270.2	16.5	44.9	331.6	30	12
297	85	148	64	276.2	14.8	43.6	334.6	34	10
310	82	122	116	284.9	9.2	42.5	336.6	30	8
338	80	100	158	290.8	24.8	39.5	355.1	24	16
366	70	98	198	302.6	80.4	37.1	420.1	18	78
412	62	80	270	320.4	168.5	34.6	523.4	14	139
438	57	78	303	330.5	209.3	33.4	573.2	12	193
460	40	72	348	339.8	245.6	32.2	617.6	10	209

주 : (1)는 15만톤급 연간 배정항차수, (2)는 10만톤급 배정항차수, (3)는 5만톤급 배정항차수

* 포항제철(주)는 양질의 제강생산을 위해 매년 해외로부터 철광석과 석탄을 국내선사들과 장기계약(COA) 형식으로 호주, 캐나다, 인도, 브라질, 중국 등지로부터 수입하고 있다. 이러한 물동량을 처리하기 위해 지난 1980년 이후 부터 4개 선석(5만톤급 1석, 10만톤급 2석, 15만톤급 1석)의 전용항만을 조성하여 운용해 왔다. 최초 약 5,000만톤 이던 수입물동량이 매년 5% - 10% 정도 증가함에 따라 해상수송비를 절감하기 위해 연간 대형선박 투입 항차수를 늘리게 되었고 이에 따라 선석대기비용이 급격히 상승하는 문제에 봉착하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해 선석이용률을 극대화하기 위해 선석간 선박이동(shift)을 하는 등의 조건 등을 반영한 최적 선형별 항차수를 결정하기 위한 시뮬레이션 모델을 구축하고 시험하였다. <부록 1>은 많은 시뮬레이션 결과 중 하나로서 확률적 모델의 결과인 만큼 본 연구의 결과도 확정적이 아닌 통계적 유의성에 의거한 것임을 밝힌다.

참고문헌

김원재, “Optimizing Total Transport Cost Incurred under Specific Port System: with a Case of Managing POSCO-owned Berths”, 『한국항만경제학회지』, 제 26권 제 3호, 2010, 42-55

이진우, “항만투자평가 개선방안에 관한 연구”, 『한국항만경제학회지』, 제 26권 제 2호, 2010, 58-81

포항제철 부두운영관리부, 부두운영일지, 2001-2005

Abdullah, S., "Heuristic Approach for University Time-tabling Problems", Thesis submitted for the degree of Ph.D., the University of Nottingham, U.K., June, 2006

Beenstock, M., "A Theory of Ship Price", Maritime Policy and Management, vol. 12, no. 3, 1985, 215-25

Brooks, M. R., and Cullinane K., "Devolution, Port Governance and Port Performance", Research in Transportation Economics, vol. 17, 2006, 55-84

El-Nagger, M. E., "Application of Queueing Theory to the Container Terminal at Alexandria Seaport", Journal of Soil Science and Environmental Management, vol. 1, no. 4, 2010, 77-85

Estrada, J., "Mean-Semivariance Behavior: Risk and Capital Asset Pricing Model", International Review of Economics and Finance, vol.16, no. 2, 2007, 169-185

Frankel, E. G., Port Planning and Development, John Wiley & Sons, Inc., 1987

Gilliam, R., "An Application of Queueing Theory to Airport Passenger Security Screening", Interfaces, vol. 9, no. 4, 1979, 117-123

Heaver, T., "The Evolution and Challenges of Port Economics", Research in Transportation Economics, vol. 16, 2006, 11-41

Kleinrock, L., Queueing Systems(I), John Wiley and Sons, 1983

Kosten, L., "Stochastic Theory of Service System", Pergamon Press, Oxford, 1973

Lai, J. W. and Chen, C. Y., "A Cost Minimization Model for Coal Import Strategy", Energy Policy, vol. 24, no. 12, 1996, 1111-17

Metaxas, B. M., The Economics of Tramp Shipping, The Athlone Press, Ltd., 1971

Musso, E., Ferrari, C., and Benacchio, M., "Port Investment: Profitability,

Economic Impact and Financing", Research in Transportation Economics, vol. 16, 2006, 171-218

Notteboom, T. and Verhoeven, P., " The Awarding of Seaport Terminals to Private Operations: European Practices and Policy Implications", European Transport, vol. 45, 2010, 83-101

Yu, C. S., and Li, H. L., "A Robust Optimization Model for Stochastic Logistics Problems", International Journal of Production Economics", vol. 64, 2000, 385-397

한국항만경제학회지 2013 제29권 3호, 159-174.

국문요약

휴리스틱 회귀모델을 이용한 특정항만 조건하에서의 선형별 적정 항차배분에 관한 연구

- 포항제철(주) 전용항만 사례를 중심으로-

김원재

본 논문은 포항제철이 제품생산에 필요한 석탄 및 철광석 등 원료를 해외로부터 수입하기 위한 전용부두를 조성하여 사용하는 과정에서 발생되는 총물류비용, 즉 해상수송비용, 항만 선석 대기비용, 그리고 원료를 야드에 적재보관 하는 데 따른 재고비용 등의 발생이 서로 상충됨에 따라 각 비용발생 행태를 함수식으로 추정하여 그 비용의 합이 최소화 될 수 있는 적정 선형별 연간 배정 항차수 의사결정을 휴리스틱적 접근법으로 시도한 내용을 보여준다. 예를 들면, 해상 수송비용은 단위당 운송비를 낮추기 위해 선형을 대형화시키려는 유인이 있게 된다. 하지만 이러한 결정은 항만내 선석 제약으로 인해 대기비용이 지수적으로 급격히 증가하게 되어 이에 대한 절충점을 찾아야 만 총 물류비용을 최소화 시킬 수 있게 된다. 선형별 연간 배정 항차수를 독립변수로 하고 발생 비용들을 종속변수로 하여 휴리스틱적 회귀분석을 시도한 결과 15만톤급 선형, 10만톤급 선형, 5만톤급 선형의 연간 항차배정 비율이 $1.78(X_1)$: $4.25(X_2)$: $1(X_3)$ 로 될 때 총물류비용 최소화 목표를 달성할 수 있는 것으로 분석되었다. 이를 백분비로 보면, 대형선 비중을 약 25%, 중형선 비중을 약 61%, 그리고 소형선 비중을 약 14% 정도로 연간항차배정을 하는 것이 적정한 것으로 판단된다. 그밖에 만약 물동량의 증가로 항만확장이 불가피한 경우 추가항만 건설투자비와 그로 인한 해상수송비 절감 및 선석 대기비용 절감 등을 현재가치화 한 값과 비교하여 전자가 큰 경우는 투자안을 기각하고 후자가 큰 경우는 투자안을 수용하는 항만투자 의사결정이 필요함을 보여주었다.

핵심 주제어 : 총물류비용, 휴리스틱적 회귀분석, 연간항차배정, 항만투자 의사결정