최소비용 기반 글로벌 항만 물류네트워크 모델 구축

✧ 장운재 · 김종수*

† 목포해양대학교, * 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수

Design of Global Port Logistics Network Model Based on Minimum Cost

✧ Woon-Jae Jang · Jong-Soo Keum*

† Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

*Division of Maritime transportation system, Mokpo National Maritime University, Mokpo 530-729, Korea

요 약 : 본 연구의 목적은 동아시아 지역을 중심으로 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하여 우리나라의 새로운 항만정책을 제안하는 것에 있다. 이러한 항만 물류네트워크의 구축을 위해 세계 50위 항만 중 21개의 항만을 중심으로, 컨테이너 화물량과 기항지를 분석하여 EU, 북미를 연결시 최소 물류비용인 동아시아 지역의 4개의 대표항만을 추출하였다. 그 결과 동아시아에서는 싱가포르, 홍콩, 상하이, 부산항이 추출되었다. 따라서, 우리나라는 싱가포르, 홍콩, 상하이항에 해외 터미널을 운영하고 부산항과 연계하는 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하여 안정적인 화물을 확보해야 한다.

핵심용어 : 글로벌, 항만 물류네트워크, 경제적인 네트워크, 최소 물류비용, 해외 터미널 운영

Abstract : This study is aimed to contribute in establishing new port policy by research and analysis in design of global port logistics network in the East Asia region. In order to build such port logistics network, 21 ports located in East Asia among the world's 50th largest ports were selected in this study. Furthermore, the amount of container cargo and the ports of call were analyzed to categorize the subject ports in East Asia. Finally, this study tries to find economic network between the base port in East Asia, EU or North America and feeder ports in terms of logistics cost.

As a result, Singapore, Hong Kong, Shanghai, and Busan ports were found as the representative ports in the East Asia that may connect North America and Europe with the minimum logistics expenses. Therefore, to maintain the stable cargo volume in ports, Korea should promote not only the overseas terminal operation which links to the Singapore, Hong Kong, and Shanghai ports, but also establish the global port logistic network connecting the Busan port.

Key words : Global, Port logistics network, Economic network, Minimum logistics expenses, Overseas terminal operation

1. 서 론

최근 WTO, FTA 체제 등으로 인하여 세계 경제의 글로벌화와 지속적인 경제성장으로 인하여 국가간의 교역량이 크게 증가하고 있다. 이러한 세계경제의 성장으로 인하여 국가간의 물동량이 크게 증가하고 있으며, 국제물류산업의 규모도 2005년 약 6조 달러에서 2010년 약 9조 달러로 증가할 것으로 예상되고 있다(한국해양수산개발원, 2006).

항만물류산업의 경우 세계적인 컨테이너 터미널 운영회사의 전체 매출 이익률은 HPH(Hutchison Port Holding)이 33%, PSA(Port of Singapore Authority)가 25%이고, 항만사업부분의 매출 이익률은 평균 35%로 제조업 평균 매출 이익률 10%보다 높은 증가율을 나타내고 있다. 따라서 향후 물류산업은 수익성과 성장 가능성이 매우 높을 것으로 예측된다. 해운분야에 있어서는 The Grand Alliance(TGA), The New

World Alliance(TNWA), CKYH(COSCO, Kawasaki Line, Yangming Line, Hanjin Shipping), Maersk Line 및 Evergreen의 대형선사들이 인수·합병(M&A) 및 얼라이언스(alliance) 등을 통하여 선복량을 증대시키고 있다. 이들 5개의 대형선사 및 얼라이언스의 컨테이너 시장 점유율은 지속적으로 증가하여 1996년 28.6%에서 2006년 42.1%로 크게 증가하고 있다. 항만분야에서는 세계 10대 컨테이너 터미널 운영회사의 2004년 세계 컨테이너 물동량 점유율은 41.3%에서 2010년에는 58.9%로 증가할 것으로 예상되며, 세계물류기업은 해외거점 터미널 확보, 인수·합병 및 얼라이언스 등을 통하여 글로벌 시장의 지배력을 강화하고 있다.

한편, 동북아시아 지역에서 물류시장의 규모는 연평균 14.1%의 높은 증가율을 보이고 있으며, 이러한 성장세는 지속될 것으로 예상되고 있다. 우리나라 컨테이너 터미널은 환적화물량 중 67.5% 이상을 점유하는 중국항·발 환적화물량이

† 교신저자 : 장운재(정회원), jwj98@mmu.ac.kr 061)240-7150

* 종신회원, jskeum@mmu.ac.kr 061)240-7166

2002년까지 연평균 30~40%대로 높은 증가율을 보였으나, 중국의 대대적인 항만시설 확충 및 대형선사의 적기항 등으로 인하여 환적화물량이 2006년 2.6% 수준으로 감소되었다. 특히, 국내적으로는 2002년~2004년까지 10.4%의 증가율을 보이던 수출화물 물동량이 제조업체의 해외이전, 산업구조의 고도화 등으로 2006년 3.6%로 감소되었다. 이러한 대내·외적인 여건의 변화로 국내 항만의 컨테이너 처리물동량이 감소되어, 결국 우리나라의 동북아시아 허브화 정책에 불확실성을 증폭시키고 있다. 또한, 지금까지 중국에 집중되던 물류흐름이 주변국으로 확산되면서 중국~동남아~인도를 연결하는 아시아 물류경로(Asian Corridor)가 새롭게 부상됨에 따라 물류흐름이 전 세계로 다변화되고 있다. 이러한 물류흐름의 변화를 고려하여 전 세계를 대상으로 다양한 항로를 구축함으로써 화물 수요를 확보할 수 있는 방안을 강구할 필요가 있다.

그러나 우리나라의 항만개발 정책은 주로 국내항만 인프라 확충에 집중되고 있어 해외항만에 대한 투자가 미약한 실정이며, 동북아시아 등 특정항로에 집중되어 있어 동북아시아 이외 지역의 화물수요를 흡수하기 어려운 실정이다.

우리나라의 물류 허브화 전략은 동북아시아 지역의 한정된 관점에서 벗어나 전 세계를 대상으로 국제물류 거점항만을 확보하고, 각 거점항만을 중심으로 화물을 집화 및 운송할 수 있는 서비스 네트워크를 구축할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 동아시아 역내를 포함하여 북미와 유럽을 연결하는 동아시아 지역의 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하고자 한다. 이러한 글로벌 항만 물류네트워크는 동아시아 각 국가간 최소비용에 기초하여 화물을 집화할 수 있는 전략적 요충지에 권역별 거점항만을 확보하고, 권역별 거점항만을 중심으로 역내 피더망으로 연결하여야 한다.

항만 물류네트워크를 구축하고자 할 때에는 네트워크를 구성하는 항만의 물동량, 서비스, 선박 운항비용 등을 고려할 수 있다. 이중 서비스는 정량화하기가 곤란하고, 항만 물동량은 항만마케팅 또는 선사의 경영전략에 의해 다른 항만으로 이전 가능하기 때문에 요소로 반영하는 것은 쉽지 않다. 따라서 가장 객관적인 요소는 항만의 지리적 위치를 반영한 선박 운항 비용이 된다. 또한, 항만 물류네트워크 구축과 관련한 기존의 연구에서도 선박 운항비용을 일반적으로 이용하고 있다. 三木은 일본/북미 양국간 컨테이너 선박의 운항 스케줄의 최적화를 통하여 주요항만을 기항하는 허브항과 피더항(Hub and Spoke)체계와 복수항을 기항하는 복수항 체계를 비교하는 모형을 개발하였다. 大和는 동아시아 지역을 대상으로 다국간 항만네트워크 문제를 연구하였고, 黒川는 동아시아의 16개 항만을 대상으로 3개 권역으로 분할하고, 북미 4개항은 2개의 권역으로, 유럽 1개의 항만을 대상으로 컨테이너선 운송 네트워크 설계에 관하여 분석하였다. 이처럼 국외에서는 항만 물류네트워크 구축과 관련된 연구가 진행되고 있지만 자국의 관점에서 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서의 연구는 거의 미미하다.

본 연구에서는 동아시아 지역 21개의 주요 항만에 대한 물

동량, 정기선의 기항항로 패턴 등을 고려하여 동아시아 지역을 4개의 권역으로 분할하고, 북미항 및 유럽항을 연결할 경우 항만 물류네트워크상 물류비용이 최소인 동아시아 4개 권역을 대표하는 4개의 대표항만을 추출하고자 한다. 또한 간선항로 및 피더항로에 대한 구축방법을 기술하고, 간선항로와 피더항로를 모두 고려한 글로벌 항만 물류네트워크 모델을 구축하고자 한다.

2. 컨테이너선의 운송 비용분석

최소비용에 기반한 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하기 위해서는 해운원가 중 컨테이너선의 원가요소를 고려할 필요가 있다.

2.1 컨테이너선의 원가

선박에 대한 원가는 다양하게 분류할 수 있지만 일반적인 해운원가는 크게 운항비와 선비로 구분된다. 운항비에는 연료비와 항비가 포함되고, 선비는 직접선비와 간접선비 등으로 구분할 수 있다. 그러나 컨테이너 항로의 경우 항비는 컨테이너 터미널 비용에 해당하기 때문에 항비는 운항비에서 제외할 수 있다. 또한 해운원가에서 유회유비는 선비에 포함되지만 유회유는 선박운항 시 소비되는 소비재로 볼 수 있으므로 운항비에 포함할 수 있다(三木・今井, 1988). 따라서 본 연구에서는 컨테이너 선박경비 항목을 Table 1과 같이 분류할 수 있다.

Table 1 Cost Factor of Shipping and Container Ship

해운원가			컨테이너선 원가	
운항비	연료비	연료비	운항비	연료비
	항비	항만설비비		유회유비
		하역비		선원비
		톤세		감가상각비
선비	직접 선비	선원비	선박 경비	금리
		수선비		고정자산세
		선용품비		선채보험비
		유회유비		수선정비비
	간접 선비	선가감가상각		대리점비
		선박세, 고정자산세		기타 (P&I보험료, 전쟁보험료)
		보험료		
		금리		
		대리점비		

한편, 각 컨테이너선박의 경비항목에 대한 내용을 기술하면 다음과 같다.

1) 운항비

① 연료비

연료비는 식(1)에 보이는 것처럼 마력과 시간에 비례한다.

$$CF = R^F \cdot E \cdot C^F \cdot T^N \quad (\text{달러}) \quad (1)$$

또, 마력은

$$E = D^{2/3} \cdot (S^N)^3 / A \quad (\text{마력}) \quad (2)$$

항해시간은

$$T^N = d_{ij} / S^N \quad (\text{시간}) \quad (3)$$

여기서, CF : 연료비, E : 마력, R^F : 연료소비율(140g/마력/시간), C^F : 중유단위(4,500달러/톤), T^N : 항해시간, D : 만재배수량, S^N : 항해속력, A : Admiralty 계수, d_{ij} : 항 i 에서 j 까지 거리이중 항속시간은 실제로 항해할 때의 시간이다. 본 연구에서는 북미항로에 운항중인 컨테이너선박 100척을 대상으로 만재 컨테이너와 만재배수량의 관계를 회귀식을 이용하여 식(4)와 같이 나타내었다.

$$D = 10.97 V + 10968.16 \text{ (ton)} \quad (\text{상관계수: } R = 0.903) \quad (4)$$

여기서 V : 선형(컨테이너 적재개수, TEU)이다.

한편, Admiralty 계수(A)는 추진기관의 소요마력을 계산하기 위해 사용되는 계수이다(隈元士, 1981). 본 연구에서는 선속에 대한 Admiralty 계수는 회귀식을 이용하여 산출하였다.

$$A = 28.21 \cdot S^N - 118.929 \quad (R = 0.720) \quad (5)$$

② 윤활유비

윤활유비도 연료비처럼 본선의 마력과 시간에 비례한다고 가정하면 식(6)과 같다.

$$CL = R^L \cdot E \cdot C^L \cdot T^N \quad (\text{달러}) \quad (6)$$

여기서 CL : 윤활유비, R^L : 윤활유 소비율(5g/마력/시간), C^L : 중유가격(1,800달러/톤)

③ 운항비와 항해시간의 관계

따라서 운항비(C^N)은 식(7)과 같다.

$$C^N = CF + CL \quad (7)$$

$$= ((R^F \cdot C^F + R^L \cdot C^L) \cdot D^{2/3} \cdot (S^N)^3 \cdot (d_{ij}/S^N)/A) \cdot 24$$

식(7)에서 연료와 윤활유의 소비율은 엔진의 성능 및 만재배수량과 선형에 의해 결정되기 때문에 선박에 따라 일정하다고 할 수 있다. 따라서 운항비 C^N 은 항해속력과 항행시간의 함수로서 나타낼 수 있다. 이러한 항해속력과 항행시간은 당해 항로에 배선할 수 있는 선박척수와 관계가 있다.

2) 선비

① 선원비

선박에 따라 승무원의 수는 다르지만 일반적으로 선박을 운

용하는 인원은 18인 정도가 대부분이다. 선원비는 1인당 선원비에 승무원수를 곱하여 산출할 수 있기 때문에 척당 선원비는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CC = C^M \cdot CM + C^H \cdot CM \quad (8)$$

여기서 CC : 선원비, C^M : 승무원비(41,040 달러/척/년), CM : 승무원수(18인), C^H : 부대비용

② 감가상각비

본 연구에서는 일반적인 선박의 감가상각(CD)을 고려하여 감가상각을 20년으로 설정하고, 잔존가치를 선가(CV)의 10%로 하여 정액 감가상각방식을 가정하면 식(9)와 같다.

$$CD = (1 - 0.1) \cdot CV / 20 = 0.045 CV \text{ (달러/척/년)} \quad (9)$$

③ 금리

금리율은 연평균 0.6%로 하고 선체장부가는 선가의 50%로 고려하여 금리(CK)는 식(10)과 같다.

$$CK = 0.003 CV \text{ (달러/척/년)} \quad (10)$$

④ 선체보험료

선체보험료(CI)는 해양사고 발생건수에 의해 다르지만 컨테이너 선사의 평균적인 해양사고 수를 이용하여 선가의 0.3%를 설정하였다.

$$CI = 0.003 CV \text{ (달러/척/년)} \quad (11)$$

⑤ 수선정비비(CM)

선박의 입거수리는 통상 매년 1~2회로 정해져 있기 때문에 수선비는 식(12)와 같다.

$$CM = 2,208 \text{ (천 달러/척/년)} \quad (12)$$

⑥ 기타(PI 보험료, 전쟁보험료)

기타비용(CX)으로는 P&I보험료, 전쟁보험료, 선박통신비 등이 있지만 여기서는 식(13)과 같이 고려하였다.

$$CX = 139 \text{ (천 달러/척/년)} \quad (13)$$

⑦ 선가

선가(CV)는 건조국과 선가의 시장상황에 따라 다르다. 따라서, (박 외, 2005)이 2004년 Lloyd's Shipping Economist의 선가자료에서 추출한 데이터를 기초로 본 연구에서는 회귀식을 이용하여 산출하였다.

$$CV = 10,868.28 V + 8,307,809 \text{ (달러/척)} \quad (14)$$

결국, 전체 선비(C^C)는 식(15)와 같다.

$$C^C = (CC + CD + CK + CI + CM + CX) / 365 \quad (15)$$

2.2 컨테이너 용기 비용

선박에서 이용하는 컨테이너는 자사 컨테이너와 리스회사로부터 대여받는 리스 컨테이너의 2가지로 크게 구분할 수 있다. 선사에서의 자사와 리스 컨테이너의 비율은 6 대 4 정도로 자사 컨테이너의 비율이 더 높다(國際輸送ハンドブック, 2007). 따라서 본 연구에서의 컨테이너 용기는 자사가 보유하는 것으로 가정하였다. 자사 보유 컨테이너의 비용은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$CCo = CCs + CCi + CCm + CCh \quad (16)$$

여기서 CCo : 컨테이너 운용비용, CCs : 컨테이너 및 사시 감가상각비, 금리, 고정 자산세, CCi : 보험료, CCm : 컨테이너 수리비, CCh : 컨테이너 핸드링 비용(공 컨테이너의 하역비, 공 컨테이너 및 사시 회송비 및 보관료)이다.

본 연구에서 컨테이너 비용자료는 Table 2와 같이 일본 6대 컨테이너 선사의 비용(三木・今井, 1988)자료를 이용한다.

Table 2 Expense of Container

타 입	컨테이너 구입가격(달러)		1개당 1일 비용(달러)	
	20피트	40피트	20피트	40피트
드라이컨테이너 (강철)	3780	6720	1.93	3.36
드라이컨테이너 (알루미늄)	6720	10920	3.36	5.46
냉동컨테이너	33600	42000	16.80	21.00
벌크 컨테이너	8400	0	4.20	0.00
Open top 컨테이너	6300	10080	3.19	5.04
Flat rack 컨테이너	7560	0	3.78	0.00

Table 2에 보이는 바와 같이 냉동컨테이너 40FT의 구입가격이 42,000 달러로 가장 비싼 것으로 나타났다. 한편, 컨테이너 선사에서는 70%이상을 드라이 컨테이너로 운반하고 있으므로 본 모델의 계산에 이용되는 선박에 적재되는 컨테이너는 드라이 컨테이너로만 한정한다.

1) 컨테이너 구입비용

여기서는 금리 10%의 자금을 7년에 걸쳐 구입하는 것으로 가정하고 7년 감가상각을 행할 경우 연평균비용을 구하였다.

$$CCb = CCk \cdot CCo = 1.497 CCo (\text{달러/척/일}) \quad (17)$$

여기서 CCb : 컨테이너 구입비(달러/척/일), CCk : 컨테이너 금리, CCo : 컨테이너 운용비용이다. 따라서 전체 컨테이너 비용(C^P)은 식(18)과 같다.

$$C^P = CCo + CCb/365 \quad (18)$$

2.3 컨테이너선 입/출항비 및 하역비

선박이 항만에 입/출항시 소요되는 경비는 선박의 크기 및

항만별로 다양하다. 항만에서 선박의 입출항비 (C^{LB})는 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C^{LB} = Ta + Tb + Tc + Td + Te + Tf + Tg + Th + Ti + Tj + Tk + Tl + Tm + Tn + To + Tp + Tq + Tr + Ts \quad (19)$$

여기서, Ta: 톤세, Tb: 선박 입/출항료, Tc: 접안료, Td: 화물입항료, Te: 항만건설비, Tf: 도선료, Tg: 예선사용료, Th: 상하차료, Ti: 검수료, Tj: 해치 개폐료, Tk: 라싱료, Tl: 라인 핸드링료, Tm: 선박 대리점료, Tn: 선박검역, To: 세관 수수료, Tp: 경비료, Tq: MWF, Tr: 컨테이너세, Ts: 쓰레기 수거료를 의미한다.

항만 하역료(C^H)는 식(20)과 같다.

$$C^H = Tu \quad (20)$$

여기서 Tu: 컨테이너 하역료이다. 따라서 컨테이너선의 입/출항비 및 하역비는 Table 3과 같다(한국해양수산개발원, 2004).

Table 3 Structure of port charges

항목(단위: 달러)	부산	상해	동경	카오슝	싱가폴	홍콩	로테르담
톤세(Ta)	0.00	12.37	4.67	1.36	0.58	0.00	0.00
선박 입/출항료(Tb)	9.08	5.53	1.44	1.24	4.09	2.22	27.80
접안료(Tc)	2.41	0.90	7.12	3.52	7.52	2.24	0.00
화물입항료(Td)	8.94	9.57	0.00	40.73	0.00	0.00	0.00
항만건설비(Te)	0.00	11.68	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
도선료(Tf)	2.09	6.08	14.33	3.51	0.54	2.50	9.70
예선사용료(Tg)	2.63	6.73	6.92	2.16	1.59	2.30	4.09
상하차료(Th)	0.00	0.00	0.00	0.00	65.65	0.00	0.00
검수료(Ti)	7.23	5.74	0.00	6.54	0.25	0.00	0.00
해치 개폐료(Tj)	0.52	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
라싱료(Tk)	9.57	0.00	0.00	0.00	2.82	0.00	0.00
라인 핸드링료(Tl)	0.27	0.07	3.39	0.30	0.43	0.18	3.19
선박 대리점료(Tm)	3.55	25.06	2.13	1.90	1.85	1.85	5.87
선박검역(Tn)	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
세관수수료(To)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00
경비료(Tp)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00
MWF(Tq)	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00	0.00
컨테이너세(Tr)	42.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
쓰레기수거료(Ts)	0.11	0.24	1.06	0.02	0.65	0.00	0.00
출/입항비 합계	88.94	84.46	41.06	61.29	86.10	11.43	50.65
하역료(Tu)	90.69	112.04	301.06	131.44	173.98	432.45	165.96
총합계	179.64	196.49	342.12	192.73	260.07	443.87	216.61

주) 하역료의 산정: 2,000TEU의 처리량, 입출항비 산정: 5,300TEU급 컨테이너선, 하역시간: 시간당 30TEU을 기준으로 함.

본 연구에서 입/출항비는 홍콩항이 11.43 달러로 가장 저렴한 것으로 나타났고, 가장 높은 항은 부산항으로 88.94 달러인 것으로 나타났다. 그러나 부산항은 2007년 1월 1일부터 컨테이너세를 폐지함으로써 입/출항비가 경쟁국에 비해 상당히 낮아지게 되었다. 하역비에서는 부산항이 90.69 달러로 가장 최소로 나타났으며, 가장 많은 항은 홍콩항으로 432.45 달러를 나타내고 있다. 기타 항만의 입/출항비 및 하역비에 관한 자료는 선사의 내부자료를 이용하였다. 그 결과, 일본의 모든 대상 항만의 하역비와 입/출항비가 동경항과 동일하고, 덴징항은

상하이항과 비교해서 입/출항비는 1.028배, 하역비는 0.7배로 하였다. 또한, 칭다오항은 상하이항과 비교하여 입/출항비는 0.94배, 하역비는 0.63배, 다이렌항은 상하이항과 비교하여 입/출항비는 0.88배, 하역비는 0.75배, 광양항은 부산항과 비교하여 입/출항비, 하역비 모두 0.67배이다. 기타 포트크랑항, 탄중펠레파스항, 람차방항, 샤먼항, 닝보항, 센젠항 등의 입/출항비, 하역비는 싱가포르항과 동일한 것으로 가정하였다.

3. 항만 물류네트워크 모델 수식화

3.1 최소비용 기반 항만 물류네트워크 모델 수식화

컨테이너 운송에 있어 간선항로상에 위치한 항만에서는 간선항로로 컨테이너가 운송되지만 간선항로 상에 위치하지 않은 항만에서는 피더항로에 의해 운송되고 있다. 따라서 간선항로 및 피더항로를 고려한 항만 물류네트워크 모델의 구축이 필요하며 식(21) ~ 식(30)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{i,j \in E} c_{ij} X_{ij} + FC_{ij} Y_{ij} \quad (21)$$

$$c = (C^N + C^C + C^P + (C^W + C^H) \cdot CSv \cdot CSp) \cdot f \quad (22)$$

$$Fc = (FC^N + FC^C + FC^P + (FC^W + FC^H) \cdot FCSv \cdot FCSp) \quad (23)$$

subject to

$$\sum_j x_{ij} - \sum_j x_{ji} = \begin{cases} 1, & (i = O) \\ 0, & (i \neq O, D) \\ -1, & (i = D) \end{cases} \quad (24)$$

$$\sum_{i \in Q} \sum_{j \in Q} X_{ij} \leq |Q| - 1, \quad O, D \notin Q, \quad Q \subset P, \quad |Q| \geq 2 \quad (25)$$

$$\sum_j y_{ij} - \sum_j y_{ji} = \begin{cases} 1, & (i = k) \\ 0, & (i \neq k, S) \\ -1, & (i = S) \end{cases} \quad (26)$$

$$\sum_j y_{kj} = \sum_j y_{jp}, \quad p \in S \quad (27)$$

$$\sum_j y_{kj} \geq 1 \quad (28)$$

$$x_{ij} \in (0, 1), \quad (i, j) \in E \quad (29)$$

$$y_{ij} \in (0, 1), \quad (i, j) \in E \quad (30)$$

여기서, 식(22)는 간선항로에 대한 컨테이너선 관련 비용으로 C^N : 컨테이너선 운항비(달러/일/척), C^C : 컨테이너선 선비(달러/일/회/척), C^P : 컨테이너 비용(달러/TEU/척), C^{TE} : 컨테이너선 입/출항비(달러/회/척), C^H : 컨테이너선 하역비(달러/TEU/회/척), CSv : 컨테이너선의 최대적재량(TEU/회/척), CSp : 컨테이너선의 적재율(%/회/척), f : 배선척수(1,2,...,n), x_{ij} : 선박이 i 항에서 j 항으로 이동하면=1, 그렇지

않으면=0인 변수이다. 식(23)은 피더항로에 관한 컨테이너선 관련 비용으로 FC^N : 피더 컨테이너선 운항비(달러/일/척), FC^C : 피더 컨테이너선 선비(달러/일/회/척), FC^P : 피더 컨테이너 비용(달러/TEU/척), FC^{TE} : 피더 컨테이너선 입/출항비(달러/회/척), FC^H : 피더 컨테이너선 하역비(달러/TEU/회/척), $FCSv$: 피더 컨테이너선의 최대적재량(TEU/회/척), $FCSp$: 피더 컨테이너선의 적재율(%/회/척), y_{ij} : 허브-피더항로상에서 피더선이 i 항에서 j 항으로 이동하면=1, 그렇지 않으면=0인 변수, O : 간선항로의 출발항, D : 간선항로의 도착항, E : 컨테이너 선박의 집합, p : 항만의 집합, k : 화주가 소속해 있는 항만의 집합, S : 컨테이너선이 기항하는 허브항의 집합을 의미한다.

목적함수 식(21)는 간선항로에서의 컨테이너선 운항비, 선비, 하역비, 입/출항비, 컨테이너 용기 비용 및 피더항로에서의 피더 컨테이너선의 운항비, 선비, 하역비, 입/출항비 및 피더 컨테이너 용기 비용을 최소화하는 함수이다.

제약조건 식(24)는 간선항로의 컨테이너선이 운항할 수 있는 항로조건, 식(25)는 간선항로가 출발항에서 목적항으로 향하는 것을 제외하고 다른 소항로를 형성하는 것을 금지하는 것을 의미한다. 식(26)은 피더항로에서 컨테이너선이 운항할 수 있는 항로조건, 식(27)은 피더항로망의 흐름 보존 방정식, 식(28)은 화주가 소속해 있는 항만이 본선 허브에 반드시 소속하도록 하는 것을 의미한다. 식(29)와 식(30)은 모든 항로의 흐름은 양수이기 때문에 비음조건을 나타낸다.

3.2 대상 컨테이너 항로

동아시아의 21개의 주요항만 중 컨테이너선의 운항항로 구조 분석 및 컨테이너 화물의 유동량과 간선항로의 대형선 취항상황 등을 분석할 때 4개 권역의 9개의 대형항만에서 극심한 경쟁이 예상된다. 이러한 4개 권역의 9개의 항만은 동남아시아에서는 싱가포르를 중심으로 한 싱가포르항, 탄중펠레파스항, 람차방항, 포트클랑항 그룹에는 싱가포르항을 대상으로 하고, 홍콩항을 중심으로 한 홍콩항, 심천항 그룹에는 홍콩항을 대상으로 하였다. 한편 동지나의 그룹은 2개의 소그룹으로 하여 상해항을 중심으로 상해항, 닝보항, 샤먼항 소그룹에는 상해항을 대상으로 하고, 카오슝항을 중심으로 카오슝항, 기룽항 소그룹에는 카오슝항을 대상으로 하였다. 또한 동북아시아에는 5개의 소그룹으로 하여 중국 북부항만의 칭다오항, 톈진항, 다이렌항의 소그룹에 톈진항을 대상으로 하였고, 한국항만의 부산항, 광양항의 소그룹에는 부산항을 대상으로 하였으며, 일본은 5대 항만인 도쿄항, 요코하마항, 오사카항, 고베항, 나고야항 중 도쿄항, 요코하마항, 오사카항의 3개항을 대상항만으로 하여 하나의 그룹으로 분류하였다. 마지막으로 기중점이 되는 항만은 유럽의 관문이 되는 로테르담항과 미국의 로스앤젤레스항으로 하였다. 또한, 컨테이너 화물의 적재율은 (박과 정, 2002)의 논문을 참고하였다. 따라서 본 연구에서

는 Fig. 1에 보이는 바와 같이 유럽항(로테르담항) ~ 동아시아(4개 권역) ~ 북미항(로스앤젤레스항)으로 컨테이너를 운송할 때 컨테이너 선형별 비용이 최소가 되는 항만들을 네트워크를 구성하고 총비용과 TEU당 비용을 산출하고자 한다.

Fig. 1 Container Shipping Line

3.3 기항 항만간 거리 및 대상 컨테이너 선박

본 연구의 최소비용 항만 물류네트워크 모델에서 이용한 기준점이 되는 북미(로스앤젤레스항)와 유럽(로테르담항) 2개의 항만과 동아시아의 21개의 주요항을 포함하여 전체 23개 항만에 대한 항만간 거리(d_{ij})는 해상거리표(日本航海士會編, 1990)를 이용하였다. 또한, 항만 물류네트워크 모델 구축에 이용된 대상선박은 2,000 TEU부터 18,000 TEU급의 컨테이너선을 대상으로 하였다. 이 대상선박은 컨테이너화의 진전에 따른 1세대 선박부터 말라카 맥스(Mallaca-max)급 컨테이너가 등장할 10세대까지이며, 컨테이너 선형별 주요 현황 (高橋宏直, 2004)자료를 이용하였다(장, 2007).

4. 글로벌 항만 물류네트워크 모델 구축

4.1 최소비용 기반 항만 물류네트워크 모델 구축

최소비용에 기반한 항만 물류네트워크 모델은 아래와 같이 5단계 절차에 의하여 구축된다.

제 1단계: 주요항 추출

주요항을 추출할 때에는 물동량을 고려하고, 주요 간선항로를 파악하여 주변 항만을 선정하게 된다.

Fig. 2 Distribution of major container port in East Asia

본 연구에서는 북미항과 유럽항을 연결하는 동아시아 지역의 항만 중 세계 컨테이너 처리량이 50위 이내의 항만을 대상으로 한다. 단, 우리나라는 부산항과 광양항의 양항체제를 유지하고 있으므로 광양항을 포함하였다. 추출된 동아시아 지역의 주요 항만에 대한 세부적인 위치는 Fig. 2와 같다.

제 2단계: 권역분할

권역분할은 동아시아 간선항로를 몇 개의 권역으로 분할할 것인가를 결정하는 것이다. 본 연구에서는 권역분할 및 대상항만의 그룹화를 위해 주요 항만의 컨테이너 화물의 유동형태, 포스트 파나마스급 이상 선박의 기항패턴을 분석하였다. 이러한 권역분할 방법을 이용하여 동아시아 지역의 항만을 4개의 권역으로 분할하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 3 Diagram for grouping in East Asian ports

제 3단계: 간선항로 구축

제 2단계에서 북미와 유럽을 연결하는 동아시아 지역 4개 권역의 항만 중 각 권역의 대표 항만을 선정하고, 각 권역의 항만을 중심으로 모든 운송 가능한 항로를 Fig. 4와 같이 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 제 2단계의 분석을 기초로 21개의 동아시아 지역 항만을 4개의 권역으로 나누고, 컨테이너 화물의 유동형태, 컨테이너선의 기항패턴을 고려하여 9개의 대상항만을 선정하였다.

Fig. 4 Design of trunk route between 4 groups in East Asian ports

제 4단계: 피더항로 구축

피더항로는 권역별 허브항을 중심으로 Fig. 5와 같은 허브항과 피더항을 연결하여 물류비용이 최소인 피더항로를 구축한다.

Fig. 5 Design of feeder route in each group of East Asian ports

제 5단계: 글로벌 항만 물류네트워크 구축

이상의 제 1단계부터 제 4단계까지의 과정을 기초로 항만 물류네트워크를 구축하는 것이다. 따라서 이상의 5단계에 의한 절차를 흐름도로 나타내면 Fig. 6과 같이 나타낼 수 있다.

Fig. 6 Flow chart for design of port logistics network

4.2 최소비용 기반 항만 물류네트워크 구축 결과

컨테이너선 최대 적재량과 적재율 및 선속을 고려하여 최소비용을 산출한 결과 동아시아 지역은 싱가포르항, 홍콩항, 상하이항, 부산항으로 네트워크를 연결하는 것이 가장 비용이 저렴한 것으로 나타났다. 한편 세부변량에 따른 비용은 Table 4와 같이 나타 낼 수 있다.

Table 4 Optimal figure of container operation for 9 ports in trunk route

세 대	통 칭	최대적재(TEU)	적재율(%)	선속(kts)	총비용(\$)	단위당 비용(\$)
3	Sub Panamax	2,000	82.0	19.5	5,198,445	2,599
4	Panamax	3,000	79.0	24.5	8,996,928	2,998
		4,000	76.0	24.5	10,187,312	2,546
5	Post panamax	5,000	72.0	24.2	11,455,652	2,291
6	Super post panamax	6,000	70.0	25	13,390,374	2,231
		7,000	68.0	26.4	16,047,462	2,292
7	Super post panamax	8,000	66.0	26.4	17,337,281	2,167
8		11,000	62.0	25.0	19,100,244	1,736
9	Ultra super post panamax	12,500(1축)	60.0	25.0	20,491,030	1,639
		12,500(2축)	60.0	25.0	23,854,677	1,908
10	Malacca-max	18,000(2축)	56.0	25.0	29,974,763	1,665

Table 4에서 보이는 바와 같이 총비용은 선형이 대형화 될 수록 증가하지만 단위당 비용은 선형이 대형화됨에 따라 비용이 감소하는 것으로 산출되었다. 현재 세계 3대 경제 블록 간 평균선형인 포스트 파나마스(5,000 TEU)급의 컨테이너선으로 연결시 TEU당 비용은 2,291 달러로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 최소비용 기반 항만 물류네트워크 구축방법을 제안하고 동아시아 역내 및 북미 또는 유럽을 연결하는 동아시아의 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하였다. 그 결과 북미와 유럽을 연결하는 동아시아에서 최소비용이 되는 항만 물류네트워크상의 4개 권역 대표항만은 싱가포르항, 홍콩항, 상하이항, 부산항이며, 세계 3대 경제 블록간 평균 선형인 포스트파나마스(5,000 TEU)급 컨테이너선으로 연결시 TEU당 비용은 2,291 달러로 나타났다.

따라서 우리나라는 부산항을 중심으로 유럽항 및 북미항과의 글로벌 항만 물류네트워크를 구축하기 위해 싱가포르항, 홍콩항, 상하이항과 연계하는 해외 터미널 운영을 추진하여 안정적인 항만물동량을 확보할 필요가 있다.

본 연구에서는 컨테이너 용기비용 등이 과거자료로 연구결과를 일반화하기에는 한계가 있다. 향후 연구에서는 화물의 최종 종착지를 고려하여 해상운송 뿐만 아니라 내륙운송까지 모두 포함하는 국제간 물류네트워크 모델로 확장할 필요가 있으며, 컨테이너 운송비 산정에 있어 리스 컨테이너 비용을 포함할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 박두진, 김현, 나철수, 남기찬(2005), “정기선 선복 확보를 위한 Space Cartering의 경제성에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제29권 2호, pp.663~668.
- [2] 박태원, 정봉민(2002), “컨테이너선 대형화와 경제성 효과 분석”, 한국해양수산개발원.
- [3] 장운재(2007), “최소비용 기반 항만 물류네트워크 모델 구축에 관한 연구”, 포목해양대학교 박사학위 논문
- [4] 한국해양수산개발원(2004), “항만시설사용료 체계 개편방안에 관한 연구”.
- [5] 한국해양수산개발원(2006), “국제 물류거점 확보 및 기업의 해외진출을 통한 글로벌 물류네트워크 구축 방안.”
- [6] 三木植彦, 今井昭夫(1988), “國際海上コンテナ輸送の運用計畫に關する考察,” 日本航海學會論文集78号.
- [7] 隈元士(1981), 成山堂書店, 船用プロペラと軸系.
- [8] 國際輸送ハンドブック(2007), オーシャンコマース.
- [9] 日本航海士會編(1990), “世界港間距離圖表,” 海文堂出版.
- [10] 高橋宏直(2004), “コンテナ輸送とコンテナ港湾,” 技報堂出版.
- [11] 三木植彦(1983), “コンテナ配船計劃,” 海運經濟研究 第17號, 日本海運經濟學會, pp. 43~64.

- [12] 大和裕幸, 角田智弘, 小山建夫, 依見彬(1996), “數理計 劃
手法によるコンテナ船航路の設計手法について,” 日本 造
船學會論文集. 第184号, pp. 611~619.
- [13] 黒川久幸, 鶴田三郎, 嶋邦彦(2000), “海上コンテナ輸送ネッ
トワークの設計に関する研究—東・東南アジアを中心とし
て—”, 日本航海學會論文集, 第101号, pp. 259~269.

원고접수일 : 2007년 9월 6일

원고채택일 : 2007년 10월 22일