

산업단지내 효율적 컨테이너 운송을 위한 수송 모형

신재영* · † 김웅섭

*한국해양대학교 물류시스템학과 교수, † 한국해양대학교 대학원

Container Transportation Models in Industrial Estate Area

Jae Young Shin* · † Woong-Sub Kim

*Division of Logistics Engineering, Korea Maritime Ocean University, Busan 606-791, Korea

† Graduate School of Korea Maritime Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 지속적인 유가 상승과 탄소배출 규제 강화는 기업들로 하여금 높은 경쟁력을 가지도록 요구한다. 따라서 고객 서비스 증대와 비용절감을 위해 효율적인 물류시스템을 구축하고 운영하는 것에 많은 노력을 기울이고 있으며 비용 경쟁력을 가지는 친환경 산업단지의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 부산시에서는 친환경정책을 통해 경쟁우위를 점하고 부족한 산업단지를 충족시키기 위해 서부산권에 '부산신항배후 국제산업물류도시'를 선정하고 개발을 진행하고 있다. 이러한 산업단지를 구축하기 위해서는 적절한 정책과 화물수송 공동화를 통한 물류시스템이 필요하다. 특히, 산업 단지내 물류시스템의 체계구축을 통한 효율적인 운영은 저비용 친환경적인 측면에서 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 물류체계를 분석하고 분석내용을 바탕으로 물류네트워크 운영모형을 제시함으로써 산업단지의 기반을 마련하는데 목적이 있다.

핵심용어 : 물류 네트워크 디자인, 공급망 관리, 컨테이너 운송, 수송모형, 차량경로문제, 탐색적 해법

Abstract : Companies are facing challenges to have high competitiveness because of continuous oil price rising and CO2 emissions regulations. Thus, companies are trying hard to construct effective logistics and operation system to achieve high customer service quality and saving cost. Also the ec-friendly industrial complex is needed. Busan is in process to construct GILC(Global Industry Logistics City) in west Busan province to achieve high competitiveness and support lack of industrial complex. To construct this kind of logistics industrial complex, it needs logistics system through proper policy and freight transportation co-operation. Especially, efficient management through logistics hierarchy construction in industrial complex is very important for low cost and eco-friendly point of view. Therefore, this paper aims to analyze logistics system and suggest operation model to present logistics complex construction base data.

Key words : Logistics Network Design, Container Transportaion, Transportaion Model, Vehicle Routing Problem, Industrial Estate Area, Supply Chain Management

1. 서 론

세계는 국제화와 경제 개방화의 진전에 따라 교역 증대와 기업간 경쟁이 심화되고 있다. 이로 인하여 기업들은 고객의 요구에 보다 신속하고 유연한 대응력을 갖추어야하며 결과적으로 국내화물 위주의 물류활동에서 국제기준에 부합되는 물류기능을 요구받고 있다. 국제화물의 운송형태도 기존의 단일 운송수단을 이용하는 것에서 Sea & Air 운송과 같은 복합일관운송형태로의 발전이 진행되고 있다. 그런데 국제화물의 처리는 항만이나 공항 주변의 도시를 통과하는 화물의 양을 확연히 증가시키게 된다. 이로 인하여 항만 및 공항 인프라 확

충 이외에도 복합운송수단의 연계 시설 정비와 물류 및 교통 계획의 수립이 필요한 실정이다. 특히 제품 시장이 다국화 되어 있는 글로벌 기업들은 이러한 환경에서 물류비용을 절감하고자 한다. 물류비 절감을 위해 기업들은 SCM을 통하여 기업의 경쟁력 제고에 주력하고 있는 추세이며 물류비 절감 및 수요를 만족시키는 방안을 모색하고 있다. 이러한 SCM의 성공을 위해서는 효율적인 물류 네트워크의 구축이 필요하다.

최근 부산에서는 세계적 추세를 따라 부산 신항만과 김해 공항 등의 인프라 주변에 위치하여 VAL(Value Added Logistics:부가가치 물류) 및 SCM 환경이 가능하게 하는 물류 도시개념의 국제산업물류도시(GILC:Global Industry Logistic

† Corresponding author : k9706@naver.com 051)410-4330

* 종신회원, shinjy@kmou.ac.kr 051)410-4335

(주) 이 논문은 "산업단지내 효율적 운송을 위한 다단계 물류네트워크 설계"란 제목으로 "2012 공동학술대회 한국항해항만학회논문집 (경주교육문화회관, 2012.6.21-24, pp.84-85)"에 발표되었음.

City)의 개발이 진행되고 있다. 이 물류도시는 수출입을 목적으로 하는 입주업체를 대상으로 공공물류서비스(Public Logistics Service)를 제공하여 효율적 운영이 가능하게 한다. 또한 친환경 정책을 통해 세계적으로 이슈가 되는 환경적 측면에서의 이득을 꾀하고 있다. 단지 내에서는 수출입을 목적으로 하는 입주업체를 대상으로 공공물류서비스를 제공하여 효율적 운영이 가능하게 한다.(Hur and Kim,2011)

국제산업물류도시에서는 친환경 목적 및 셔틀 운송의 효율성을 위해 단지 내 외부운송 차량 운행을 제한한다. 따라서 산업단지 내에는 전용 친환경 수송수단(예를 들면 가스차량)으로만 운영하게 된다. 이러한 환경 하에서 컨테이너의 흐름은 단지 외부에서 유입되는 공로운송과 단지 내에서의 셔틀운송으로 나눌 수 있다. 셔틀운송의 경우에는 단지 내의 입주업체와 거점, 터미널과의 운송 등이 이 범주에 속하게 된다. 공로운송은 운송업체의 관리에 따라 장거리 운송, 근거리 운송 등으로 구분되며 수출입 물량의 주체인 화주의 위치에 따라 결정된다.

컨테이너 물류에 관한 선행 연구의 경우 컨테이너 관리 운영에 대한 연구가 대부분이며, 컨테이너 운송에 관한 연구는 상대적으로 적다. Kim et al(1998), Chung et al(2007)는 컨테이너 운송의 형태, 컨테이너의 특성, 컨테이너 차량의 종류 차량의 운영 방식등과 같은 컨테이너 운송의 특성을 설명하고 다양한 운송 모형을 수립하였다. 문제에 대한 해법으로 휴리스틱 알고리즘을 제시하여 운송회사에서 수집한 문제 상황에 적용하였다. Shin et al(2008)은 콤팩트 새시 차량을 고려한 컨테이너 차량 경로 문제에 대한 모형을 제시하였다. 모형은 리퀘스트 클러스터링이라는 개념으로 문제를 m-TSP로 변경할 수 있다는 점에 초점을 두고 수립되었다. Shin et al(2009)는 콤팩트 새시 차량과 셔틀 운송을 고려하여 문제를 설정하였다. 또한 컨테이너 공로 운송 문제를 체계적으로 접근하기 위한 수리 모형과 타부 서치를 이용한 휴리스틱 해법을 제시하였으며, 수치 실험을 통해 해법의 유용성을 검증하였다.

이러한 운송모형 연구들은 모두 상하차 지점이 미리 정해져있다고 기본적으로 가정하고 있다. 본 논문에서는 이전 연구들과는 달리 상차 또는 하차 시에 특정 거점을 미리 정하지 않고 여러 거점들 중에서 선택할 수 있는 컨테이너 운송 모형을 연구하고자 한다. 본 연구는 국제산업물류도시 뿐만 아니라 블록화된 산업단지 또는 컨테이너 터미널과 배후단지 내의 컨테이너 운송 등에도 응용될 수 있을 것으로 생각된다.

2. 운영 방안과 모형화

본 연구에서 다루고자 하는 문제는 산업단지 내에 있는 지역 거점(Depot)들과 입주 업체들 간의 컨테이너 셔틀 운송에 관한 문제이다. 지역 거점들은 물류센터와 입주업체들을 연결해주는

역할을 담당하며, 단지 내에 복수개가 설치되어 있다. 각 거점은 입주업체로 운송할 컨테이너, 입주업체로부터 운송되어온 컨테이너, 공 컨테이너 등을 일시적으로 보관한다.

효율성을 위해 산업단지 내의 거점들을 공동으로 운영하는 경우, 방문할 거점을 미리 정해두지 않고 운송경로 상에서 가장 적절한 위치에 있는 거점을 이용할 수 있다. 이때 생각해 볼 수 있는 경우란 입주업체에 운송할 컨테이너를 다수의 거점들 중에서 선택해서 상차하는 경우(예를 들면 공컨테이너)와 입주업체에서 상차한 컨테이너를 다수의 거점들 중에서 선택하여 하차하는 경우가 있을 수 있다. 따라서 상하차 위치가 미리 정해진 경우도 포함하면 다음과 같은 네 가지 운송 방식이 나올 수 있다.

첫 번째 운영 방식은 가장 일반적인 형태로 컨테이너 상차 지점과 하차 지점이 정해져 있는 경우이다. 두 번째 운영 방식은 하차 지점은 정해져 있지만 상차 지점은 복수의 상차 가능 지점들 중에서 하나를 선택할 수 있는 경우이다. 세 번째 운영 방식은 상차 지점은 정해져 있지만 하차 지점이 복수의 하차 가능 지점들 중에서 하나를 선택할 수 있는 경우이다. 마지막 운영 방식은 복합적인 형태로 두 번째와 세 번째 방식을 결합한 경우이다. 네 가지 운영 방식을 모형화 하기 위해서 사용된 모수와 변수들은 다음과 같이 정의된다. 여기서 하나의 작업이란 차량이 상차 지점에서 컨테이너를 상차해서 하차 지점까지 운반하는 것으로 정의한다.

N : 모든 작업들의 집합

$N^+ = N \cup \{0\}$: 0는 차량의 최초 출발지와 최종 도착지를 위한 가상 노드

M : 지역 거점들의 집합

K : 차량들의 집합

T : 차량의 최대 운행 가능 시간

t_{ij} : 작업 i 시작 시간부터 작업완료후 작업 j 위치로 이동할때까지의 시간

$x_{ij}^k = \begin{cases} 1: \text{차량 } k \text{가 작업 } i \text{를 수행 후 작업 } j \text{수행을 위해 이동하면} \\ 0: \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

$x_{0j}^k = \begin{cases} 1: \text{차량 } k \text{가 최초로 작업 } i \text{를 수행을 위해 이동하면} \\ 0: \text{그렇지 않으면} \end{cases}$

t_i^k : 차량 k 의 작업 i 의 시작 시간

3.1 모형 I - 상하차 지점이 결정된 경우

모형 I은 [Fig 1]에서 보는 바와 같이 운반할 컨테이너의 상하차 지점이 미리 결정되어 있는 일반적인 형태의 모형이다. 운행 차량 대수의 최소화를 목적함수로 하는 모형 I의 수리적 모형은 다음과 같다.

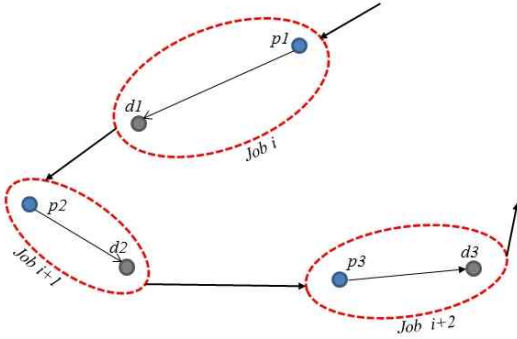


Fig. 1 Vehicle Route for Model I

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k \quad (1)$$

subject to

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in N^+} x_{ij}^k = 1 \quad i \in N \quad (2)$$

$$\sum_{j \in N^+} x_{ij}^k - \sum_{j \in N^+} x_{ji}^k = 0 \quad k \in K, i \in N^+ \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^k \leq 1 \quad k \in K \quad (4)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + t_{ij} \leq t_j^k \quad k \in K, i \in N^+, j \in N \quad (5)$$

$$t_i^k + t_{i0} \leq T \quad i \in N, k \in K \quad (6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad i \in N^+, j \in N^+, k \in K \quad (7)$$

목적함수인 (1)은 컨테이너 운송에 사용된 전체 차량 대수의 최소화를 나타낸다. 제약식 (2)는 각 작업은 한번만 수행되어야 한다는 것을 나타낸다. 제약식 (3)은 네트워크의 Flow Conservation 제약을 의미한다. 제약식 (4)는 차량의 가용성을 의미한다. 제약식 (5)는 작업 시작 시간을 결정하는 제약조건을 의미하며, 제약식 (6)은 차량 k의 운행 시간에 대한 제한을 나타낸다.

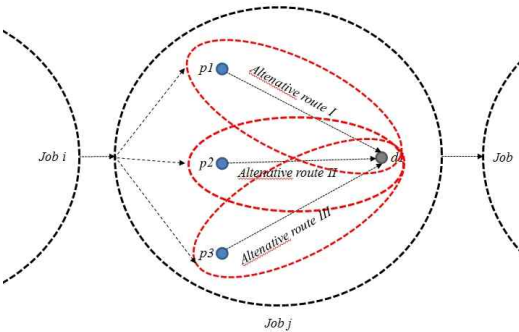


Fig. 2 Vehicle Route for Model II

3.2 모형 II - 복수개의 상차 가능 지점들이 있는 경우

모형 II는 컨테이너 운송의 하차 지점은 결정되어 있지만 상

차 지점은 여러 개의 후보지 중에서 하나를 선택할 수 있는 경우이다. 이는 거점에 있는 공컨테이너를 입주업체에 운반할 때 발생할 수 있다. 모형 I과 달리 미리 지정된 거점의 공컨테이너를 입주업체에 운반하지 않고 차량 운행 경로를 고려하여 경로상 가장 가까운 거점에 있는 공컨테이너를 업체에 운반할 수 있도록 하는 경우이다. 이런 운영 방식을 도입하면 공차 운행 거리의 단축 효과를 얻을 수 있다. [Fig 2]는 모형 II의 복수개의 상차 후보지가 있는 경우를 보여주고 있다.

모형 수립을 위한 추가적인 모수 및 변수, 그리고 추가적인 제약식들은 다음과 같다.

N_1 : 복수개의 상차 가능 지점을 가지는 작업들의 집합

s^j : j 작업을 위한 후보 지역 거점(depot)들의 집합

$$y_{inj}^k = \begin{cases} 1: \text{차량 } k \text{가 작업 } i \text{를 수행하고 } n \text{ 거점으로 이동 후} \\ \text{작업 } j \text{를 수행하면} \\ 0: \text{그렇지 않으면} \end{cases}$$

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k$$

subject to Eqs. (2)-(4), (6)-(7)

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + t_{ij} \leq t_j^k \quad i \in N, j \notin N_1, k \in K \quad (5')$$

$$x_{ij}^k = \sum_{n \in M} y_{inj}^k \quad i \in N, j \in N_1, k \in K \quad (8)$$

$$\sum_{n \in s^j} y_{inj}^k = 0 \quad i \in N, j \in N_1, k \in K \quad (9)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + \sum_{n \in M} t_{inj} y_{inj}^k \leq t_j^k \quad i \in N, j \in N_1, k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N_1} y_{inj}^k \leq C_n \quad n \in M \quad (11)$$

제약식 (8)와 (9)은 차량 k가 공컨테이너 작업 시 선택할 수 있는 대안 경로 중 하나의 경로를 선택할 수 있는 것을 의미한다. 제약식 (10)은 제약식 (5)의 변형으로 경로 m 선택에 따른 작업 시작 시간을 결정하는 제약조건이다. 제약식 (11)은 각 지역거점의 컨테이너 최대 공급가능량 제약이다.

3.3 모형 III - 복수개의 하차 가능 지점들이 있는 경우

모형 II의 반대의 경우로 컨테이너 운송의 상차 지점은 결정되어 있지만 하차 지점은 여러 개의 후보지 중에서 하나를 선택할 수 있는 경우이다. 이는 입주 업체에서 상차한 컨테이너를 미리 지정한 특정 거점으로 이동하는 대신 차량 운행 경로를 고려하여 가까운 거점에 하차 하는 경우이다. 이 운영 방식도 차량의 공차 운행 거리를 단축시키는 효과를 얻을 수 있다. [Fig 3]은 모형 III의 복수개의 하차 후보지를 설명하고 있다.

모형에 사용된 추가적인 모수와 변수, 그리고 모형 III의 수리적 모형은 다음과 같다.

N_2 : 복수개의 하차 가능 지점을 가지는 작업들의 집합
 s^i : i 작업을 위한 후보 지역 거점(depot)들의 집합

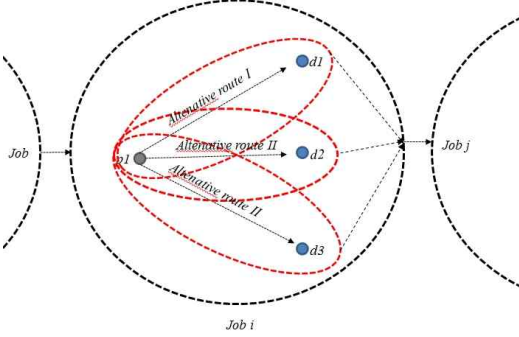


Fig. 3 Vehicle Route for Model III

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k$$

subject to Eqs. (2)-(4), (6)-(7)

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + t_{ij} \leq t_j^k \quad i \notin N_2, j \in N, k \in K \quad (5)''$$

$$x_{ij}^k = \sum_{m \in M} y_{imj}^k \quad i \in N_2, j \in N, k \in K \quad (12)$$

$$\sum_{m \notin s^i} y_{imj}^k = 0 \quad i \in N_2, j \in N, k \in K \quad (13)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + \sum_{m \in M} t_{imj} y_{imj}^k \leq t_j^k \quad i \in N_2, j \in N, k \in K \quad (14)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N} y_{imj}^k \leq E_m \quad m \in M \quad (15)$$

제약식 (5)''과 (14) 모두 작업 시작 시간을 결정하는 제약조건이다. 다만 제약식 (5)''은 상하차 지점이 모두 지정되어 있는 경우의 제약이고, 제약식 (13)은 복수개의 하차 지점 대안들이 있는 경우의 제약이다. 제약식 (15)는 지역 거점의 최대 보관 가능량 제약이다.

3.4 모형 IV - 복수개의 상하차 가능 지점이 있는 경우

모형 IV는 모형 II와 모형 III의 가정을 모두 포함하는 모형이다. 즉 상하차 지점이 미리 정해진 작업들, 복수개의 상차 지점 대안들을 가진 작업들, 그리고 복수개의 하차 지점 대안들을 가진 작업들이 모두 공존하는 모형이다. 모형에 사용된 추가적인 모수와 변수, 그리고 모형 IV의 수리적 모형은 다음과 같다

$$\text{Minimize } \sum_{k \in K} \sum_{j \in N} x_{0j}^k$$

subject to Eqs. (2)-(4), (6)-(8)

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + t_{ij} \leq t_j^k \quad i \in N_2, j \notin N_1, k \in K \quad (5)'''$$

$$x_{ij}^k = \sum_{n \in M} y_{inj}^k \quad i \notin N_2, j \in N_1, k \in K \quad (16)$$

$$x_{ij}^k = \sum_{m \in M} y_{imj}^k \quad i \in N_2, j \notin N_1, k \in K \quad (17)$$

$$x_{ij}^k = \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} y_{imnj}^k \quad i \in N_2, j \in N_1, k \in K \quad (18)$$

$$\sum_{n \notin s^i} y_{inj}^k = 0 \quad i \notin N_2, j \in N_1, k \in K \quad (19)$$

$$\sum_{m \notin s^i} y_{imj}^k = 0 \quad i \in N_2, j \notin N_1, k \in K \quad (20)$$

$$\sum_{m \notin s^i} \sum_{n \notin s^i} y_{imnj}^k = 0 \quad i \in N_2, j \in N_1, k \in K \quad (21)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + \sum_{n \in M} t_{inj} y_{inj}^k \leq t_j^k \quad i \notin N_2, j \in N_1, k \in K \quad (22)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + \sum_{m \in M} t_{imj} y_{imj}^k \leq t_j^k \quad i \in N_2, j \notin N_1, k \in K \quad (23)$$

$$x_{ij}^k = 1 \rightarrow t_i^k + \sum_{m \in M} \sum_{n \in M} t_{imnj} y_{imnj}^k \leq t_j^k \quad i \in N_2, j \in N_1, k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_1} y_{imj}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_1} \sum_{m \in M} y_{imnj}^k \leq C_n \quad n \in M \quad (25)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_1} y_{imj}^k + \sum_{k \in K} \sum_{i \in N_2} \sum_{j \in N_1} \sum_{n \in M} y_{imnj}^k \leq E_m \quad m \in M \quad (26)$$

제약식 (16)-(21)는 복수 대안 경로중 하나를 선택할 수 있는 조건을 나타낸다. 제약식 (5)'''과 (22)-(24)는 작업 시작 시간 제약을 의미한다. 제약식 (25)은 거점의 공컨테이너의 최대 공급 가능량 제약이며, 제약식 (26)은 거점에서의 최대 보관 가능량 제약을 의미한다.

3. 해법 및 실험

본 논문에서 제시한 모형들은 차량운행문제(Vehicle Routing Problem)의 형태를 가진다. 차량운행문제의 경우 혼합정수계획 모형으로 전형적인 NP-Hard 문제이다.(Haughton,1998) 결국 최적해를 구하고자 할 때 문제의 규모에 따라 계산시간이 엄청나게 증가하며, 큰 규모의 문제는 최적해를 구하지 못하는 경우가 대부분이다. 따라서 제시한 모형들의 해를 도출하기 위해 본 논문에서는 휴리스틱 해법을 제안한다.

3.1 해법

본 모형들을 위해 제안하려는 해법은 운송 경로 상에 새로운 작업을 추가해 나가는 Tour-constructrion 유형의 해법이다. 해법의 기본 개념은 새로운 운송 작업 p 를 차량 k 의 운행 경로 상에 있는 연속된 작업들 i 와 j 사이에 삽입해 나가 결국 모든 운송 작업들을 운행하는 경로들로 구성하는 방식이다. 새로운 작업 p 의 삽입할 위치는 작업 p 를 추가함으로써 발생하는 운행시간 증가분 $\Delta T_p^k(i, j)$ 가 가장 작은 작업 i 와 j

사이 가 된다. 물론 이 위치에 삽입하려면 차량의 최대 운행 시간 및 거점 용량 제약 등과 같은 제약조건을 만족해야 한다. 해법을 정리하면 다음과 같다.

단계 0 (초기화 단계)

- 차량의 총운행시간과 거점의 허용 가능량 등을 초기화.
- 미배정 차량 $k \in K$ 을 선택하고, $K \leftarrow K - \{k\}$ 로 변경.

단계 1 (작업 선택)

- 미배정 작업 $p \in N$ 을 선택하고, $N \leftarrow N - \{p\}$ 로 변경.
- 만약 $N = \emptyset$ 이면 해법 종료.

단계 2 (삽입 위치 선택)

- 차량 k 의 경로상의 연속 작업 i 와 j 에 대하여 $\Delta T_p^k(i, j)$ 를 모든 배정 차량 및 배정 작업들에 관해 계산하고, 이들 중 작업 p 의 삽입에도 시간 및 용량 제약을 만족하는 위치들 중에서 $\Delta T_p^k(i, j)$ 를 최소로 하는 k, i, j 를 구함. $\Delta T_p^k(i, j)$ 값은 다음과 같음.

(i) $i \notin N_2, j \notin N_1$ 경우

$$\Delta T_p^k(i, j) = t_{ip} + t_{pj} - t_{ij}, \quad p \notin N_1 \cup N_2$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{n \in S^p} \{t_{ip}\} + t_{pj} - t_{ij}, \quad p \in N_1$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = t_{ip} + \min_{n \in S^p} \{t_{pmj}\} - t_{ij}, \quad p \in N_2$$

(ii) $i \in N_2, j \notin N_1$ 경우

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{n \in S^i} \{t_{imp}\} + t_{pj} - \min_{n \in S^i} \{t_{inj}\}, \quad p \notin N_1 \cup N_2$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{m \in S^i} \{t_{imnp}\} + t_{pj} - \min_{m \in S^i} \{t_{inj}\}, \quad p \in N_1$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{m \in S^i} \{t_{imp}\} + \min_{l \in S^p} t_{lpj} - \min_{m \in S^i} \{t_{inj}\}, \quad p \in N_2$$

(iii) $i \notin N_2, j \in N_1$ 경우

$$\Delta T_p^k(i, j) = t_{ip} + \min_{n \in S^j} \{t_{pnj}\} - \min_{n \in S^j} \{t_{inj}\}, \quad p \notin N_1 \cup N_2$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = t_{ip} + \min_{n \in S^j} \{t_{pmnj}\} - \min_{n \in S^j} \{t_{inj}\}, \quad p \in N_1$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{l \in S^p} \{t_{ilp}\} + \min_{n \in S^j} \{t_{pnj}\} - \min_{n \in S^j} \{t_{inj}\}, \quad p \in N_2$$

(iv) $i \in N_2, j \in N_1$ 경우

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{m \in S^i} t_{imj} + \min_{n \in S^j} \{t_{pnj}\} - \min_{m \in S^i} \{t_{imnj}\}, \quad p \notin N_1 \cup N_2$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{m \in S^i} t_{imp} + \min_{m \in S^i} t_{imnj} - \min_{m \in S^i} t_{imnj}, \quad p \in N_1$$

$$\Delta T_p^k(i, j) = \min_{l \in S^p} t_{ilmp} + \min_{n \in S^j} t_{pni} - \min_{n \in S^j} t_{imnj}, \quad p \in N_2$$

단계 3 (작업 삽입)

- 단계 2에서 구한 차량 k 의 운행 경로상의 작업 i 와 j 사이에 작업 p 를 삽입.
- 적절한 k 를 구하지 못했다면 새로운 차량 $k \in K$ 을 선택하고, 작업 p 를 차량 k 에 배정. $K \leftarrow K - \{k\}$ 로 변경.
- 차량의 총운행시간과 거점의 허용 가능량의 값을 조정함.
- 단계 1로 돌아감.

3.2 실험 및 분석

본 연구에서 제시한 해법의 효율성을 알아보기 위해 총 12개의 수치 실험을 시행하였다. 최적해와의 비교를 위해 최적해는 혼합정수계획법을 풀이하는 일반 패키지 ILOG Cplex 12.0을 이용하였고, 제안한 휴리스틱은 Visual Basic으로 직접 구현하였다. 실험에 사용된 문제들은 총 작업 수 5, 10, 15, 20, 50, 100 개의 경우로 각각 2회씩 실험하였다.

Table 1 Computational Result of Proposed Heuristic

Problem No.	Number of Jobs	Number of Vehicles	
		Heuristic	Exact Solution
1	5	2	2
2	5	2	2
3	10	2	2
4	10	4	3
5	15	4	4
6	15	5	5
7	20	5	N/A
8	20	5	N/A
9	50	11	N/A
10	50	11	N/A
11	100	20	N/A
12	100	36	N/A

실험 결과로 <Table 1>은 각 문제별 운행 차량 대수를 나타내고 있다. Cplex로 구할 수 있는 작업 수 15 개 이내의 문제들과 비교해 보면 하나의 경우를 제외하고는 제안한 해법으로 최적해를 찾을 수 있었다. 나머지 한 경우도 최적해와 차이가 적었다. 계산 시간을 살펴보면 Cplex는 작업의 수가 5 개인 경우에는 1초 정도에 구했지만, 그 이상은 시간이 급격히 늘어나 15 개 경우는 40분 정도로 많이 걸렸다. 20 개 이상은 최적해를 찾지 못했다. 반면 제시한 휴리스틱의 경우는 모든 경우 0.1 초 이내의 빠른 시간 내에 해를 구하였다.

다음으로, 제시한 휴리스틱을 이용해 본 논문에서 제안한 4 가지 모형의 효율성을 살펴보았다. 상하차 지점이 지정된 경우에 비해 자유롭게 거점을 사용할 때 얼마나 효과가 있는지를 실험을 통해 알아보았다. 실제 산업단지의 경우 입주업체 수가 1000 개를 넘는 경우가 많은 점을 감안하여 작업 수가

100 개부터 1000 개까지 다양하게 설정하였다. 차량별 최대 운행시간은 10 시간과 18 시간의 경우로 나누어 실험해 보았다. 각 모형들의 차량 대수와 차량들의 총운행시간은 <Table 2>와 같다. 실험 결과 모든 상하차 지점이 정해져 있는 모형I 보다 하나의 상하차 지점이 정해져 있는 모형II, 모형III이 필요로 하는 차량 대수가 평균적으로 20% 이상 감소했으며, 모형VI는 30% 이상의 효율성을 보였다.

차량 총 운행시간 측면에서 살펴보면 1000 개의 작업을 가지는 경우 모형I 과 모형VI의 차량 총 작업시간이 700 시간이 넘는 차이를 보여주고 있다. 또한 작업의 수가 많을수록, 각 차량의 최대 운행 시간이 짧을수록 효율성의 차이가 더 큰 것으로 나타나 혼잡한 작업환경에서 더 많은 효과를 볼 수 있을 것으로 판단된다. 다만 상하차 지점이 정해져 있는 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 작업 지시 및 관리가 용이할 수 있으므로 모형 선정할 때 이런 점을 감안할 필요는 있다.

Table 2 Performance Comparison among Models

	No. of Jobs	Vehicle Time	Model I	Model II	Model III	Model IV
NoV*			71	56	61	48
TTT**	100	10	238	196	206	178
NoV	300	10	71	56	61	48
TTT			678	535	580	464
NoV	500	10	118	94	86	76
TTT			1140	894	848	744
NoV	700	10	168	136	136	109
TTT			1611	1314	1303	1067
NoV	1000	10	230	179	186	149
TTT			2235	1744	1786	1472
NoV	100	18	15	12	12	10
TTT			260	203	216	169
NoV	300	18	41	32	35	27
TTT			710	554	598	476
NoV	500	18	65	53	48	43
TTT			1157	943	856	758
NoV	700	18	96	80	80	62
TTT			1677	1399	1371	1101
NoV	1000	18	128	102	105	84
TTT			2273	1804	1842	1494

* Number of Vehicles ** Total Travel Time(Hours)

4. 결론

본 연구에서는 제한 구역 내에서 내부 운송 차량들에 의해 컨테이너 셔틀 운송이 이루어지는 산업단지를 대상으로 차량 운행 경로 문제를 다루었다. 외부 트럭의 반입/반출을 금지하고 친환경 차량으로 내부 거점간의 운송을 담당하도록 계획 중인 부산신항 배후 국제산업물류도시의 경우에도 본 연구가 도움이 될 것으로 생각된다.

본 연구에서는 거점과 입주업체간의 운송 방식으로 네 가지 모형을 수립하였다. 그리고 작업이 많은 경우도 해를 찾을 수 있도록 휴리스틱을 제안하였으며, 수치 실험을 통해 그 효율성을 살펴보았다. 또한 제시한 모형들을 이용한 실험을 통해 운행 중 자유롭게 거점을 사용할 때의 효과도 분석해보았다.

실제 현장에서 일정계획을 수립할 때 본 연구 결과를 활용하여 효율적인 차량 운행 계획을 작성할 수 있을 뿐만 아니라 단지내 필요 차량 대수의 결정에도 도움이 될 것으로 생각된다. 또한 계산시간이 아주 짧은 본 해법은 산업 단지 설계를 위한 시뮬레이션 모형의 하부 모형으로 활용하기에 적절하다.

그러나 본 연구는 산업단지 내에서의 운송형태 중 지역거점과 입주업체로 범위를 한정하여 연구하였으며 산업단지의 물류터미널과 지역거점간의 연구나 외부수송수단과의 연계성 연구는 범위에 포함하지 않았다. 따라서 향후에는 지역거점과 입주업체, 물류터미널과 지역거점 및 산업단지 외부의 운송도 연계한 종합적인 운송 네트워크 구축 및 설계 시뮬레이션에 관한 연구가 이루어지면 좋겠다.

References

- [1] Chung, K. H., Ko, C. S., Hwang, H., Kim, K. H., Shin, J. Y. (2007), "Development of mathematical models for the container road transportation in Korean trucking industries", Computers & Industrial Engineering, Vol. 53, pp. 252-262.
- [2] Houghton, M. A.(1998), "The Performance of Route Modification and Demand Stabilization Strategies in Stochastic Vehicle Routing", Transportation Research, Vol. 32, pp. 551-566.
- [3] Hur, Y. S., and Kim, Y.S.(2011), "Implementation and Public Logistics Service Plan Policies for GILC in Busan S.korea", Publication of Busan Development Institute.
- [4] Kim, G. H., Ko, C. S., Shin, J. Y.(1998), "A Review Study on Quantitative Models for Freight Transportation Planning and Operation ", IE Interfaces, Vol. 11 No. 1, pp. 1-14.
- [5] Shin, J. Y., Oh, S. I.(2008), "Vehicle routing problem for combined chassis container " Proceedings of the Korean Institute of Navigation and Port Research Conference 2008, pp. 155-156.
- [6] Shin, J. Y., Oh, S. I., Park, J. W.(2009), "An Efficient Heuristic to Solve Vehicle Routing Problem for Container Shuttle Service", Journal of Navigation and port research, Vol. 33 No. 8, pp. 583-588.

원고접수일 : 2014년 2월 4일
 심사완료일 : 2014년 3월 27일
 원고채택일 : 2010년 4월 2일