

수송 네트워크에서 빈 장비 흐름의 계산법

김갑환[†]

부산대학교 산업공학과

Calculating Empty Moves in Transportation Networks

Kap Hwan Kim

Department of Industrial Engineering, Pusan National University, Busan, 609-735

Empty moves are necessary when there are imbalances among transportation demands from source locations to destination locations and the transportation demands require empty equipment that must be supplied to source locations. When the amount of the inflow exceeds that of the outflow or the amount of the outflow exceeds that of the inflow, repositioning empty equipment is necessary. Examples of the empty equipment are containers, chassis, and pallets. This paper addresses how to estimate the empty moves on several typical transportation networks. Types of transportation networks considered are chain, tree, cycle, tree of cycles, and hybrid networks. Simple procedures are suggested for determining the optimal empty flows. Numerical examples are provided to illustrate procedures in this paper.

Keywords: container, transportation, graph, optimization

1. 서론

컨테이너를 운송하는 문제에서 가장 중요한 문제 중의 하나는 컨테이너에 물품을 담아서 목적지에 물품을 운반한 다음 다시 그 빈 컨테이너를 필요로 하는 지점까지 빈 컨테이너를 운반하는 것이다. 컨테이너 운송회사의 총 운영비용 가운데 주요한 부분을 차지하고 있는 것이 빈 컨테이너를 재배치시키는 것과 관련되어 있으므로 빈 컨테이너의 이동을 효율적으로 관리하는 것은 매우 중요하다. 더구나 고객에 대한 서비스를 향상시킨다는 측면에서도 고객의 요청이 있을 때 즉시 공급할 수 있게 함으로써 빈 컨테이너가 없어서 발생하는 판매 손실을 최소화시켜야 할 필요가 있다.

우리나라의 운송회사들은 유럽-중동-극동, 미주-극동 경로 상에서 고정된 스케줄의 운송 서비스를 제공해 오고 있다. 그러나 우리나라 국제무역의 불균형 때문에 어떤 지역으로는 수출이 대부분이고 어떤 지역으로부터는 수입화물이 대부분의 물량을 차지한다. 이러한 무역상의 불균형 때문에 빈 컨테이너의 관리가 더욱 중요하게 되었다. 극동의 항만에서는 빈 컨

테이너에 대한 수요가 공급을 초과하게 되고, 유럽이나 미주 지역에서는 빈 컨테이너의 공급이 수요를 초과하게 된다. 유럽지역에서는 20피트 크기의 빈 컨테이너가 공급과잉이 되는 반면 미주지역에서는 40피트 크기의 빈 컨테이너가 남아 돌게 된다.

극동지역에서의 빈 컨테이너에 대한 고객의 초과수요에 대응하기 위해서 운송회사에서는 몇 가지 전략 중의 하나를 선택할 수 있다. 첫 번째, 미주나 유럽 등으로부터 잉여 빈 컨테이너를 가져올 수 있다. 두 번째, 수요가 발생한 항만에서 필요한 빈 컨테이너를 임대할 수 있다. 세 번째, 사용 가능한 빈 컨테이너가 없을 때 고객을 경쟁사에 넘기든지 고객에게 빈 컨테이너가 생길 때까지 기다리도록 설득할 수 있다. 그러나 마지막 선택은 해당 운송회사에 판매손실과 고객에 대한 회사 신뢰도의 실추를 야기하므로 바람직한 대처방안이 아니다.

타 항만으로부터 운송되는 잉여 컨테이너가 빈 컨테이너에 대한 초과수요를 완전히 만족시킬 수 없는 경우에, 회사는 초과수요가 있는 여러 항만들 가운데에서 어느 항만에 얼마만큼의 컨테이너를 할당할 것인지를 결정하는 방법이 필요하다.

이 연구는 한국과학재단이 지원하는 목적기초연구사업에 의해서 수행되었음 (R01-2003-000-10077-0).

[†] 연락저자 : 김갑환 교수, 609-735 부산광역시 금정구 장전동 부산대학교 산업공학과, Fax : 051-512-7603, E-mail : kapkim@pusan.ac.kr
2004년 7월 접수; 2005년 6월 수정본 접수; 2005년 6월 게재 확정.

또 어떤 항만은 빈 컨테이너의 단기 임대를 통해 수요를 만족시키거나 만족되지 않는 부분에 대해서는 판매를 포기하는 결정을 하게 될 것이다. 본 연구에서는 이와 같은 빈 컨테이너 할당문제를 다루고자 한다.

빈 컨테이너의 가용 여부가 고객의 주문을 수용하기 위한 필수조건이고 빈 컨테이너나 적재(full) 컨테이너나 하나를 운송하기 위해서는 거의 비슷한 수준의 비용이 소모됨을 고려할 때, 빈 컨테이너의 효율적인 운영은 운송회사의 수익성에 큰 영향을 미침에 틀림없다. 이를 위하여 모든 운송회사에서는 가장 유능한 전문가를 빈 컨테이너의 수급과 운용 계획 부분에 배치해 두고 수작업으로 계획하고 있다. 만약 이 계획업무에 최적화 기법을 활용함으로써 의사결정을 지원할 수 있다면 그 경제적 효과가 막대할 것으로 예상된다.

본 연구의 결과는 컨테이너에 국한 하는 것이 아니라 서로 다른 출발지와 도착지를 가진 수송요구들 사이에서 수송량이 불균형을 이룰 때 화물을 담아서 이동해야 할 다양한 장비가 대상이 된다. 한 예로서, 컨테이너, 샷시, 팔렛트, 트레일러, 화차 등을 들 수 있다. 본 논문에서는 앞으로 이런 특성을 가진 장비들을 통칭하여 “빈 장비”라고 부른다.

화물의 유입과 유출이 하나의 지점에서 완전하게 균형을 이루고 있다는 말은 빈 장비의 유입량과 유출량이 같으며, 빈 장비를 재배치(repositioning)하여 추가 공급할 필요가 없다는 것을 의미한다. 그러나 유입량이 유출량을 초과하거나, 유출량이 유입량을 초과하였을 때, 빈 장비들의 재배치가 필요하다.

이 문제에 대한 국내·외 연구나 실무상황은 다음과 같다. 빈 컨테이너의 수송에 관한 문제는 국내에서는 적재 컨테이너 수송문제에 비하여 소홀히 취급되어 왔다. 현장에서는 의사결정을 위하여 수리적인 모형이나 의사결정 지원시스템을 사용하지 않고 컴퓨터에서 제공되는 정보를 바탕으로 계획자의 직관과 과거의 계획자료에 근거하여 그때그때 경험적으로 의사결정을 하고 있는 실정이다. 변화하는 상황과 많은 자료를 바탕으로 효율적인 의사결정을 하는 데는 한계가 있다고 할 수 있다. 따라서 가장 중요하다고 느끼는 문제이면서도 이를 개선하기 위한 방안을 찾지 못하고 있는 실정이고 이 문제가 분석적인 방법으로 접근이 가능하다는 것도 알려져 있지 않은 상태이다. 빈 컨테이너 수송문제가 적재 컨테이너 수송문제와 별도로 다루어지는 것은 적재 컨테이너 수송계획은 주로 선박회사의 영업부에서 작성되고 이는 회사의 매출과 직결되기 때문에 우선적으로 작성된다. 이 적재 컨테이너 수송계획에 따라 컨테이너 박스 자체의 수송경로와 수송량이 결정되면 다음으로 이 컨테이너 수요를 만족시킬 수 있도록 빈 컨테이너를 어떻게 조달할 것인가 하는 빈 컨테이너 조달계획이 작성되는데, 그 조달방안 중의 일부가 재배치를 통하여 조달하는 것이다. 재배치를 하여도 해결할 수 없는 빈 컨테이너 수요에 대해서는 임대나 구매 등을 통한 추가공급으로 대처하게 된다. 따라서 빈 컨테이너의 재배치문제는 적재 컨테이너의 수송문제

와 별도로 취급될 수 있고 또 임대나 구매 등을 통한 빈 컨테이너 추가공급 문제와도 별도로 취급될 수 있는 독립적인 문제라고 할 수 있다.

화물운송을 위한 빈 수송수단의 흐름(Empty flow)과 선대 관리 모형에 관한 최근의 문헌 조사에서 Dejax and Crainic (1987)은 컨테이너 운송문제에 목적을 둔 모형개발에 상대적으로 많은 노력이 있지 않았음을 지적했다. Crainic and Laporte (1997)는 화물운송 계획 및 운영에 관한 주요 이슈들을 정리하고 구체적인 OR 모형, 방법론, 컴퓨터 기반 계획도구 등을 소개하였다. 빈 컨테이너의 운송은 수요를 만족시키기 위한 흐름이라는 측면에서 균형화 요구(Balancing Requirement)가 있는 문제라고 볼 수도 있다. 이에 관한 연구들이 몬트리올 대학교의 수송연구소(Center of Research on Transportation(CRT))에서 대표적으로 많이 수행되어 왔다(Abrache, 2001; Crainic, 1989; Crainic, 1993a; Crainic, 1993b; Crainic, 1993c; Gendron, 1997). Dejax and Crainic(1987)의 조사는 1960년대부터 이 분야에 기여한 여러 가지 간단한 정적인 운송모형에서부터 동적이고 추계적인 모형에 이르기까지 기존의 연구들을 살펴보았다. CRT에서 이루어진 연구들은 주로 확정적인 모형과 수리계획법에 근거한 알고리즘을 제시하고 있다. 그리고 주로 육로 수송을 대상으로 하고 있기 때문에 더 글로벌한 입장에서 국제적인 컨테이너 흐름의 상황들이 반영되어 있지 않다. 그러나 Du(1997)는 빈 컨테이너 문제를 컨테이너 재고비용과 부족비용의 상충관계로서 해석하는 재고관리 관점에서 접근하여 적정재고수준을 찾는 방법을 제안하였다.

Lai *et al.*(1995)은 항만 간의 빈 컨테이너 수송문제까지를 고려한 국제적인 흐름을 고려하여 간단한 운영규칙들에 대해서 시뮬레이션을 통하여 테스트를 하였다. 수리계획법적인 분석과 모델링의 완성도는 부족하지만 처음으로 대륙 상호간의 흐름을 고려한 문제를 정의하였다는 점에서 의의가 있다고 하겠다. Shen and Khoong(1995)은 이 문제를 다품목 최소비용 네트워크 흐름문제(multi-commodity minimum-cost network flow problem)로 모델링하였는데, 처음으로 컨테이너의 임대와 반납을 다루고 임대기간에 따라 컨테이너 임대비용을 부과했다. Hall(1999)은 수송 네트워크에서 흐름상의 불균형과 임의성을 측정하는 방법을 개발하고 적용했으며 불균형 비용에 대해서 논했다. 이 논문은 현재 운영에 주요한 영향을 주는 네 개의 파라미터를 제시하였다.

이상의 연구에서는 빈 장비가 이동할 수 있는 경로가 일반적인 형태의 네트워크로 표현되고 네트워크의 각 호(arc)는 유한한 용량(capacity)을 가지고 있다고 가정하였으므로 다품목 최소비용 네트워크 흐름 문제로 모형화하여 풀 수밖에 없었다. 다품목 최소비용 네트워크 흐름 문제는 빈 장비의 흐름뿐만 아니라 화물이 적재된 장비의 흐름도 함께 고려할 수 있는 범용적인 모형이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 일반적인 수송 네트워크를 대상으로 하는 대신 현실에서 많이 발견할 수 있는 몇 개의 대표적인 간단한

수송 네트워크를 대상으로 빈 장비의 이동을 추정할 수 있는 간단한 방법을 제시하고자 한다. 이들 간단한 네트워크의 특성으로 인하여 다품목 최소비용 네트워크 흐름 문제를 위한 해법보다 훨씬 간단한 해법을 사용하여 문제를 풀 수 있다는 것이 본 논문의 주제이다. 이 논문에서 대상으로 한 수송 네트워크의 형태는 체인(chain), 트리(tree), 단방향 사이클(cycle), 단 방향 사이클로 구성된 트리, 또한 트리와 단방향 사이클 간의 복합형태(hybrid type)를 대상으로 한다. 이상에서 열거한 네트워크에서는 출발 노드와 도착 노드가 결정될 경우에는 그 경로가 단 하나로 고정된다는 특성을 가지고 있고, 이 특성으로 인하여 화물이 적재된 장비의 흐름에 대해서는 그 흐름 경로의 결정을 더 이상 고려할 필요가 없다.

다음 장에서는 체인 형태의 수송 네트워크를 대상으로 하고, 3장에서는 트리 네트워크, 4장에서는 단방향 사이클 네트워크, 5장에서는 단방향 사이클로 구성된 트리 네트워크, 6장에서는 트리와 단방향 사이클 간의 복합형태의 네트워크를 대상으로 하여 빈 장비의 흐름 문제를 다룬 다음 마지막 장에서 결론을 제시하고자 한다.

2. 체인 형태의 서비스 네트워크에서의 빈 장비 흐름

체인은 노드들이 일렬로 연결된 형태의 네트워크를 말하며 인접 노드들 사이에 양방향 아크가 연결되어 있다. 여기서 노드는 화물을 받아들이고 내보내는 지점을 나타내는데, 항만, 도시, 내륙 데포(in-land depot) 등을 대표한다. 편의상 본 논문에서는 “(수송) 센터”라고 부른다. 아래의 기호를 사용하여 설명하도록 한다.

v_i = 센터 i 에서의 내용물이 든(적재) 장비의 순초과 흐름(overflow)의 양. 이 숫자는 음이 될 수도 있는데 음이 되는 경우에는 빈 장비가 부족하다는 뜻이다.

N_i = 센터 i 를 나타내고 네트워크 상의 노드 i .

$d(N_i, N_j)$ = 센터 N_i 에서 N_j 까지 거리.

R_{ij} = 센터 i 에서 j 까지의 빈 장비의 재배치 양(의사결정 변수). 센터 i 와 노드 i 는 같은 의미로 사용한다.

수송 네트워크가 두 개의 서로 다른 끝단의 노드들 사이의 체인으로 나타나고 수송장비는 주행하는 동안 체인 상의 모든 센터를 방문해야 한다고 가정한다. 다음과 같은 기호는 체인 네트워크(chain networks)에서의 빈 장비 이동의 유용한 특성들을 묘사하는 데 유용하다. x_i 를 수송 체인에서 센터 i 의 위치라고 하고, $v(x) = \sum_{i \in (x_i \leq x)} v_i$ 라고 하자. 그러면 다음과 같은 유용한 성질을 도출할 수 있다.

Property 1: 수송 체인 상에서 수송장비가 앞과 뒤로 움직일 때, 빈 장비의 총 수송거리의 최소값은 (1)과 같다.

$$TC = \sum_{i=1}^{N-1} |v(x_i)| |x_{i+1} - x_i|. \tag{1}$$

그리고 $v(x_i) \geq 0$ 일 때, $R_{i(i+1)} = v(x_i)$ 이고 $R_{(i+1)i} = 0$ 이다. 반면, $v(x_i) < 0$ 이면, $R_{(i+1)i} = |v(x_i)|$ 이고 $R_{i(i+1)} = 0$ 이다. 또한 각 호(arc)에서의 이와 같은 흐름은 모든 가능해에서의 동일 호 상의 흐름량 중에서 최소값이다.

(증명) 어떤 포인트 x_p 에 대하여 $v(x_p)$ 는 x_p 를 지나는 최소한의 흐름(흐름량의 하한값)이다. 왜냐하면 빈 컨테이너의 수요와 공급의 합이 x_p 의 양쪽에서 각각 같아야 하기 때문이다. 따라서 $|v(x_p)|dx$ 는 어떤(x_p, x_p+dx)의 구간에서 주행한 거리의 하한값(lower bound)이다. 따라서, 식 (1)의 우변의 값은 총 수송거리의 하한값이다. 한편, 가능 해(feasible solution)는 dv 컨테이너들의 수평방향 띠(horizontal slices)를 고려하여 곡선 $v(x)$ 의 올라가는 부분과 교차하는 점으로부터 그것이 떨어지는 부분과 교차하는 점까지 그 양(dv)만큼 이동시킴으로써 구할 수 있다(<Figure 1>). 이 경우 <Figure 1>에서와 같이 dv 장비는 B에서 C까지 운반된다. 따라서 작은 dv 에 대한 작은 띠(slice)들의 모든 합은 식 (1)의 우변을 나타내는데, 이는 가능해의 총 수송거리이므로, 최소 총 수송거리의 상한값이 된다. 그리고 $v(x_i)$ 가 0보다 크거나 같다면, 센터 i 로부터 센터 $i+1$ 까지의 빈 장비의 이동은 $v(x_i)$ 가 된다. 반면에 $v(x_i)$ 가 0보다 작다면 센터 $i+1$ 부터 센터 i 까지 빈 장비의 이동은 $v(x_i)$ 가 된다. 이와 같은 흐름은 위에서 각 구간에서 흐름량의 하한값이라고 하였으므로 이는 모든 가능해 중에서 최소의 흐름량을 주는 가능해이기도 하다. 증명 끝.

Cumulative surplus

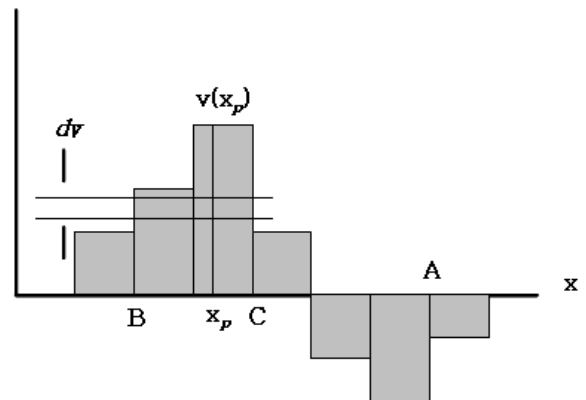


Figure 1. Cumulative surplus curve of empty equipment on a chain.

Daganzo and Smilowitz(2000)은 Property 1에서 제시된 빈 장비의 흐름이 최소 수송거리 흐름이라는 사실은 밝혔으나 각 아크에서 최소 흐름량을 준다는 사실은 언급하지 않았다. 그러나 최소 흐름량을 준다는 사실은 여러 가지 빈 장비에 대해서 Property 1을 이용하여 제시된 각 호에서의 흐름량의 합이

그 해당 호의 용량을 초과하는 경우에는 이 문제를 다목적 최소 비용 네트워크 흐름문제로 모형화해서 풀어도 가능해가 없다는 것을 말하므로 의미 있는 사실이라고 할 수 있다.

아래 <Figure 2>는 빈 장비의 흐름을 계산하는 간단한 예제이다.

이때 $v(x_1) = 10, v(x_2) = v(x_1) + 10 = 20$.

그리고 $TC = |10 \times 7| + |(10+10) \times 5| = 170$ 이다.

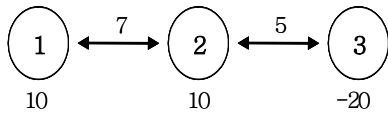


Figure 2. An example of empty flows on a chain

3. 단방향 사이클 네트워크에서의 빈 장비 흐름

수송장비가 단방향 사이클 형태의 수송 네트워크 상에서 움직인다고 가정한다. 예를 들면 Hong Kong → Chiwan → Laem Chabang → Singapore → Los Angeles → Oakland → Kaohsiung → Hong Kong으로 이루어지는 현대상선의 컨테이너 선박의 동남아시아 운송 서비스가 그 예이다.

빈 장비의 총 수송거리의 최소값을 추정하기 위하여 우선 기준점(reference position)을 결정하여야 한다. 사이클 상의 임의의 노드로부터 누적 잉여 그래프를 그리면 <Figure 1>처럼 될 것이다. <Figure 1>과 같은 누적 잉여 그래프에서 가장 작은 값으로부터 $v(x_p)$ 값이 증가하는 노드를 찾는다. <Figure 1>에서 노드 A이며 지금부터 이 노드를 기준점이라고 부른다. 그 다음, 누적 잉여 그래프를 노드 A로부터 그리기 시작한다. 그러면 누적 잉여 그래프는 <Figure 3>과 같이 나타낼 수 있다. 이 새로운 그래프에서는 0 이하로 내려가는 부분이 없다는 것에 주목하라. x_i 는 사이클에서의 기준점으로부터 N_i 까지의 거리이다. 그러면 다음과 같은 성질이 성립한다.

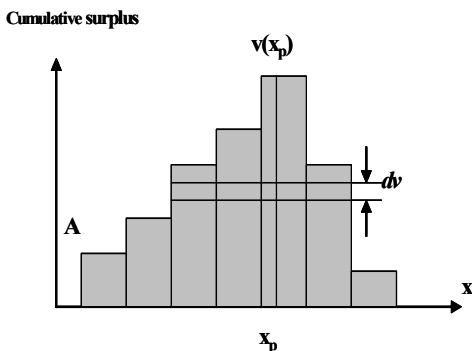


Figure 3. Cumulative surplus curve for empty equipment on a cycle

Property 2: 수송장비가 단방향 사이클 형태의 수송 네트워크 상에서 움직일 때, 빈 컨테이너의 총 수송거리의 최소값은 식 (2)와 같다.

$$TC = \sum_{i=1}^{N-1} v(x_i) |x_{i+1} - x_i|. \quad (2)$$

그리고 $R_{i(i+1)} = v(x_i)$ 이다.

또한 각 호(arc)에서의 이와 같은 흐름은 모든 가능해에서의 동일 호 상의 흐름량 중에서 최소값이다.

(증명) 어떤 x_p 포인트에서 $v(x_p)$ 는 x_p 에서 x_{p+1} 까지의 최소 흐름이다. 왜냐하면 기준점에서 x_p 까지 빈 장비의 누적 잉여분은 어떠한 경우에도 x_{p+1} 까지 움직여져야 한다. 즉, $v(x_p)$ 는 그 구간 사이의 흐름량의 하한값이다. 따라서 $v(x_p)$ 는 어떤 (x_p, x_p+dx) 의 구간에서라도 주행한 거리의 하한값이다. 즉, 식 (1)의 우변은 총 수송거리의 하한값이다. 반대로, 가능해는 dv 개의 장비들의 수평 띠(slice)를 고려하여 그 띠가 곡선 $v(x)$ 의 올라가는 부분과 교차하는 점으로부터 그 띠가 $v(x)$ 의 떨어지는 부분과 교차하는 점까지 해당되는 양을 운반함으로써 만들어질 수 있다(<Figure 3>). 따라서, 그 작은 dv 에 속한 띠들의 모든 합은 (2)의 우변 항을 나타내고, 이는 또한 가능해의 총 수송거리이므로, 최소 총 거리의 상한값이다. 총 수송거리의 하한값과 상한값이 같으므로 이것이 최소 총 수송거리이다. 이때 노드 i 로부터 노드 $i+1$ 까지 빈 장비 이동량은 $v(x_i)$ 가 된다. 이 이동량은 노드 i 와 노드 $i+1$ 사이의 흐름량의 하한값이기도 하므로 모든 가능해에서의 동일 호 상의 흐름량 중에서 최소값이다 증명 끝.

<Figure 4>의 예제를 풀어보자. 기준점은 누적 합이 가장 작은 위치에서 증가하는 위치인 N_1 이다. 이때 $R_{13} = 10, R_{32} = 20, R_{21} = 0$.

그리고 $TC = 10 \times 7 + (10+10) \times 5 = 170$ 이다.

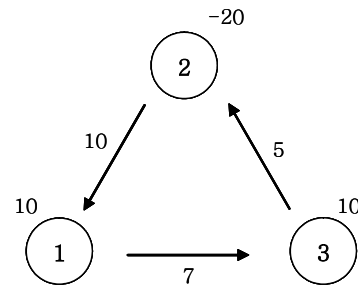


Figure 4. An example of empty flows on an unidirectional cycle

4. 트리(tree) 서비스 네트워크에서의 빈 장비 흐름

수송 서비스 네트워크가 트리로 나타난다고 가정하자. 체인은 트리의 특별한 예라는 것을 유념하라. 그리고 수송 트리는 <Figure 5>의 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 빈 장비의 잉여분 혹은 부족분과 센터들 사이에서의 거리 데이터를 가지고 있다. 각 노드에 나타난 숫자는 센터에 대응하는 곳에서의 빈 장비의 부족분 또는 잉여분을 나타낸다. 반면에 각 아크들의 숫자는 센터들 사이의 거리를 나타낸다. 그때, 빈 장비의 할당문제와 총 운행 거리의 최소화문제에서 최적해는 다음과 같은 방법으로 찾아진다.

트리 상에서의 최적 빈 장비 흐름 결정절차(Optimal Empty Moves on Tree: OEMT)

단계 0: $TC = 0$

단계 1: 남겨진 노드가 하나라면 그때 멈춘다. 아니면, 트리에서 임의의 끝점(N_i)를 선택하고 N_i 에 인접한 노드를 N_j 라 하자. $v_j = v_j + v_i$, $TC = TC + |v_i|d(N_i, N_j)$ 로 바꾸어라. N_i 와 N_j 사이의 아크와 N_i 를 제거한다. 단계 1의 처음으로 가서 다시 실행한다.

<Figure 5>의 (a)~(d)까지는 해 절차의 처음 세 단계를 예시하고 있다.

Property 3: OEMT는 트리 서비스 네트워크에서 빈 장비 할당문제에 대해서 최소 총 수송거리를 주고 그때의 각 호 상에서 빈 장비의 흐름은 모든 가능해에서의 빈 장비의 흐름 중에서 최소의 흐름량을 준다.

(증명) OEMT는 기본적으로 N_i 에 합쳐진(rolling up) 모든 노드들의 잉여분 또는 부족분을 N_j 에 직접 연결된 N_j 에 더함으로써 N_i 와 N_j 사이의 빈 장비 흐름량을 찾는다. 왜냐하면, N_i 에 합쳐진 노드들과 N_j 의 누적 불균형은 N_j 로부터(로) 빈 장비를 받아서(보내어서) 해결될 수밖에 없다는 트리의 속성 때문이다. 따라서 N_i 와 N_j 의 거리로 곱해진 누적 불균형은 N_i 와 N_j 사이에서 빈 장비의 총 운행거리의 하한값이다. 그리고 이 누적 불균형 값은 N_i 와 N_j 사이의 흐름량의 하한값이다. 또한, OEMT 절차에 의해서 빈 장비의 모든 잉여분은 다른 노드의 부족분에 의해서 해결되기 때문에 OEMT는 가능해를 준다. 따라서 OEMT에 의해서 주어진 총 수송거리는 최소 총 수송거리의 상한값이다. 그리고 이때의 각 호에서의 흐름량은 그 호에서의 흐름량의 하한값이기도 하므로 모든 가능해에서의 흐름량 중 최소 흐름량이 된다. 따라서 위의 성질이 성립한다. 증명 끝.

5. 단방향 사이클로 구성된 트리 상에서의 빈 장비 흐름

단방향 사이클로 구성된 트리는 각각의 사이클이 트리처럼 결

합된 네트워크로 정의된다. <Figure 6>은 단방향 사이클 트리를 나타낸다. 사이클들이 트리처럼 결합되어 있다. 서로 인접한 사이클은 그들 사이에 단 하나의 공통 노드를 공유하는 것을 유념하라. 전형적인 예는 Busan(0) → Kaohsiung(2) → Hong Kong(3) → Shanghai(4) → Busan(0) → Nagoya(5) → Yokohama/Tokyo(1) → Tacoma(7) → Seattle(8) → Vancouver(9) → Portland(6) → Yokohama/Tokyo(1) → Busan(0)의 형태인 현대상선의 북서 태평양 운송 서비스이다. 부산과 도쿄/요코하마는 사이클을 도는 동안에 두 번 포함되어 있다. 이 서비스 경로는 <Figure 7>에서 보여주는 단방향 사이클의 트리로서 나타나게 된다.

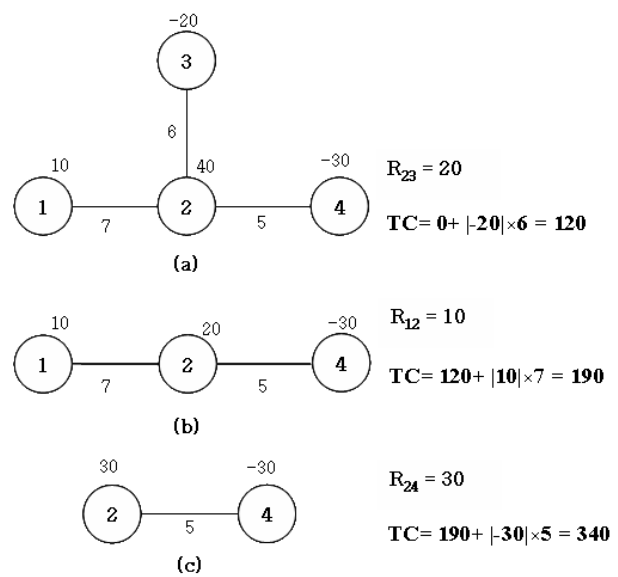


Figure 5. An example of empty flows on a tree.

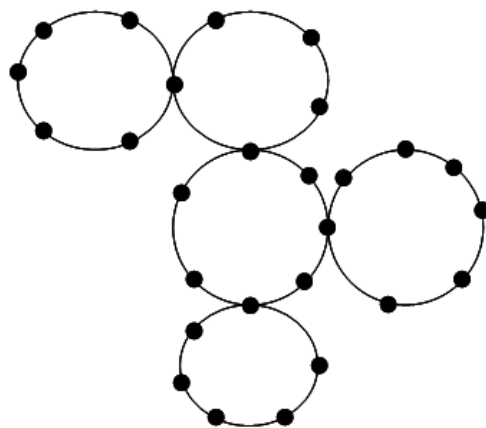


Figure 6. An example of a tree consisting of unidirectional cycles.

다른 사이클과 한 공통 노드에서만 접촉된 사이클을 끝마디 사이클(tip cycle)이라고 부른다. 끝마디 사이클은 하나의 노드에서 다른 사이클과 접촉되어 있다. 이 접촉된 노드를 공유 노

드라고 부르겠다. 그때 끝마디 사이클에 관한 다음과 같은 성질은 해를 효율적으로 구하기 위해 유용하다.

Property 4: 어느 한 끝마디 사이클 상에 빈 장비 잉여 노드 A와 빈 장비 부족 노드 B가 있다고 하자. 노드 A에서 노드 B로 빈 장비를 운반하는 것이 그 끝마디 사이클 외부의 빈 장비 잉여 노드에서 노드 B로 운반하는 것보다 운반거리가 짧다.

(증명) 공유 노드 N_i 에서 네트워크의 다른 부분과 접촉된 한 끝마디 사이클을 생각해 보자. 그 끝마디 사이클 상에 빈 장비 잉여 노드 A 하나가 존재하고 다른 빈 장비 부족 노드 B가 하나 존재한다고 가정하자. 또한, 끝마디 사이클의 외부에는 빈 장비 잉여 노드 C와 다른 빈 장비 부족 노드 D가 하나 존재한다고 가정한다. 빈 장비가 A에서 B까지 C에서 D까지 공급되어질 때, 총 운행거리의 합은 $d(A, B) + d(C, D)$ 이다. 그러나 빈 장비가 C에서 B까지, A에서 D까지일 때 총 운행거리의 합은 $d(C, N_i) + d(N_i, B) + d(A, N_i) + d(N_i, D)$ 이다. 삼각부등관계 (Triangle inequality)에 의해서 $d(A, B) + d(C, D) \leq d(C, N_i) + d(N_i, B) + d(A, N_i) + d(N_i, D)$ 이다. 따라서 이 성질이 성립한다. 증명 끝.

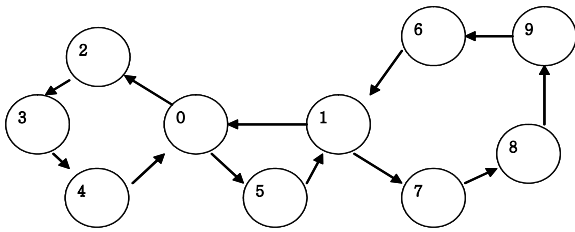


Figure 7. An example of container transportation network

Property 4를 기반으로 다음과 같은 알고리즘이 네트워크의 빈 장비 불균형을 해결하는 데 적용되었다.

단방향 사이클들로 구성된 트리에서의 최적 빈 장비 흐름 결정절차(Optimal Empty Moves on Trees of Unidirectional Cycles: OEMTUC)

단계 1: 만약에 남아 있는 사이클이 하나만 존재한다면 단계 3으로 간다. 아니면, 끝마디 사이클을 하나 선택하여 그 끝마디 사이클 상의 모든 노드의 v_i 값을 합쳐서 그 값을 u 로 나타내자. 그 끝마디 사이클의 공통 노드의 v_i 값을 u 만큼 줄인다. 단방향 사이클 형태의 서비스 네트워크 상에서 빈 장비의 이동량을 결정하는 절차를 적용하여 그 끝마디 사이클의 최적 빈 장비 흐름을 계산한다.

단계 2: 선택된 끝마디 사이클에서 공통 노드를 제외한 모든 노드를 제거한다. 남은 공통 노드의 v_i 를 u 로 변화시키고 단계 1로 간다.

단계 3: 마지막 사이클에 대해서 단방향 트리 네트워크에서

최적 빈 장비 흐름을 결정하는 절차를 적용한다. 그리고 멈춘다.

Property 5: OEMTUC 절차는 단방향 사이클로 구성된 트리 상에서 최적의 빈 장비 흐름량을 결정한다. 그리고 그 결과 얻어지는 각 호에서의 흐름량은 모든 가능해에서의 각 호 상의 흐름량 중 최소이다.

(증명) Property 4에 의해서 각 끝마디 사이클 상의 최적 흐름은 그 끝마디 사이클 상의 공유 노드의 v_i 값을 u 만큼 줄인 후, 단방향 사이클 상의 최적 흐름문제를 OEMT 방식으로 풀어 구할 수 있다. 이렇게 결정된 각 호 상의 흐름량은 단방향 사이클에서처럼 모든 가능해에서 해당 호 상의 흐름량 중 최소값이 된다. 끝마디 사이클 상에서의 u 값은 끝마디 사이클에서 인접 사이클로(로부터) 가야 하는(와야 하는) 최소 흐름량이다. 흐름량이 결정된 끝마디 사이클 상의 모든 호를 삭제하면 끝마디에 인접한 사이클이 다시 끝마디 사이클이 되어 동일한 주장을 할 수 있다. 따라서 이 성질이 성립한다. 증명 끝.

<Figure 8>은 <Figure 7>의 서비스 네트워크에 대해서 빈 장비의 최적 흐름을 계산해 본 예이다. 우선 각 센터에서의 빈 장비의 잉여분과 부족분이 <Figure 8>의 (a)의 노드 옆에 기재된 숫자와 같다고 하자. 그러면 다음과 같이 해 절차가 수행된다.

단계 1: 최 우측 끝마디 사이클을 선택한다. $u = -140$. 노드 0의 v_i 값이 90으로 바뀐다(<Figure 8>의 (b)). 그러면 <Figure 8>의 (b)와 같은 단방향 사이클 상에서의 빈 장비 흐름 결정문제가 되고 이를 풀어 보자, 기준점은 노드 0이 된다. 각 아크 상의 흐름은 $R_{02} = 90, R_{23} = 50, R_{34} = 60, R_{40} = 0$ 이 된다. 그리고 그때의 총 운반거리 $TC = (90 \times 2) + (50 \times 2) + (60 \times 3) = 460$ 이다.

단계 2: <Figure 8>의 (c)와 같이 남은 그래프가 바뀐다.

단계 1: 다음 끝마디 사이클을 <Figure 8>의 (d)와 같이 선택하였다. 기준점은 노드 7이다. $R_{78} = 20, R_{89} = 90, R_{96} = 80, R_{61} = 90, R_{17} = 0$. $TC = 460 + (20 \times 2) + (90 \times 1) + (80 \times 3) + (90 \times 4) + (0 \times 6) = 460 + 730 = 1,190$.

단계 2: <Figure 8>의 (d)와 같은 그래프가 남는다.

단계 1: 기준점은 노드 5이다. $R_{51} = 20, R_{10} = 140, R_{05} = 0$. $TC = 1,190 + (20 \times 1) + (140 \times 5) + (0 \times 3) = 1,910$.

6. 트리와 단방향 사이클의 혼합 네트워크 상에서의 빈 장비 흐름

이 장에서는 앞 장에서 다루었던 단방향 사이클의 트리를 하나의 노드로 보았을 때, 이들이 다시 트리를 이루는 혼합 네트워크 상에서의 빈 장비 최적 흐름을 찾는 문제를 다루어 보겠다. 앞 장에서 다루었던 단방향 사이클의 트리를 하나의 노드로 보고, 이 노드를 슈퍼노드라고 부르자. 여기서 원래 그래프의 노드를 원래 노드라고 불러 슈퍼 노드와 구분하겠다.

하나의 슈퍼 노드는 하나의 원래 노드로 이루어질 수도 있

다. 트리와 단방향 사이클의 혼합 네트워크는 노드로서 슈퍼 노드를 가지고 있는 트리로 정의된다.

<Figure 9>는 슈퍼 노드 6개로 이루어진 혼합 네트워크의 실제적인 예이다. 연결 노드는 혼합 네트워크 상에서 트리의 양방향 호에 연결된 슈퍼 노드 상의 원래 노드를 말한다. <Figure 9>의 (a)에서 원래 노드 1이 연결 노드의 한 예이다. 혼합 네트워크의 빈 장비 불균형을 해결하기 위해 다음과 같은 절차를 적용한다.

하이브리드 트리에서의 최적 빈 장비 흐름 결정절차
(*Optimal Empty Moves on a Hybrid Tree: OEMHT*)

단계 1: 만약에 노드가 하나만 남아 있다면 그때 알고리즘을 종료한다. 임의의 끝마디(tip) 노드를 찾는다. OEMT를 이용하여 끝마디 노드를 그것에 인접한 노드에 말아 올린다. 이 단계를 끝마디 노드가 더 이상 존재하지 않을 때까지 반복한다. 만약에 끝마디 노드가 존재하지 않는다면 그때 단계 2로 간다.

단계 2: 하나보다 더 많은 원래 노드들로 이루어진 임의의

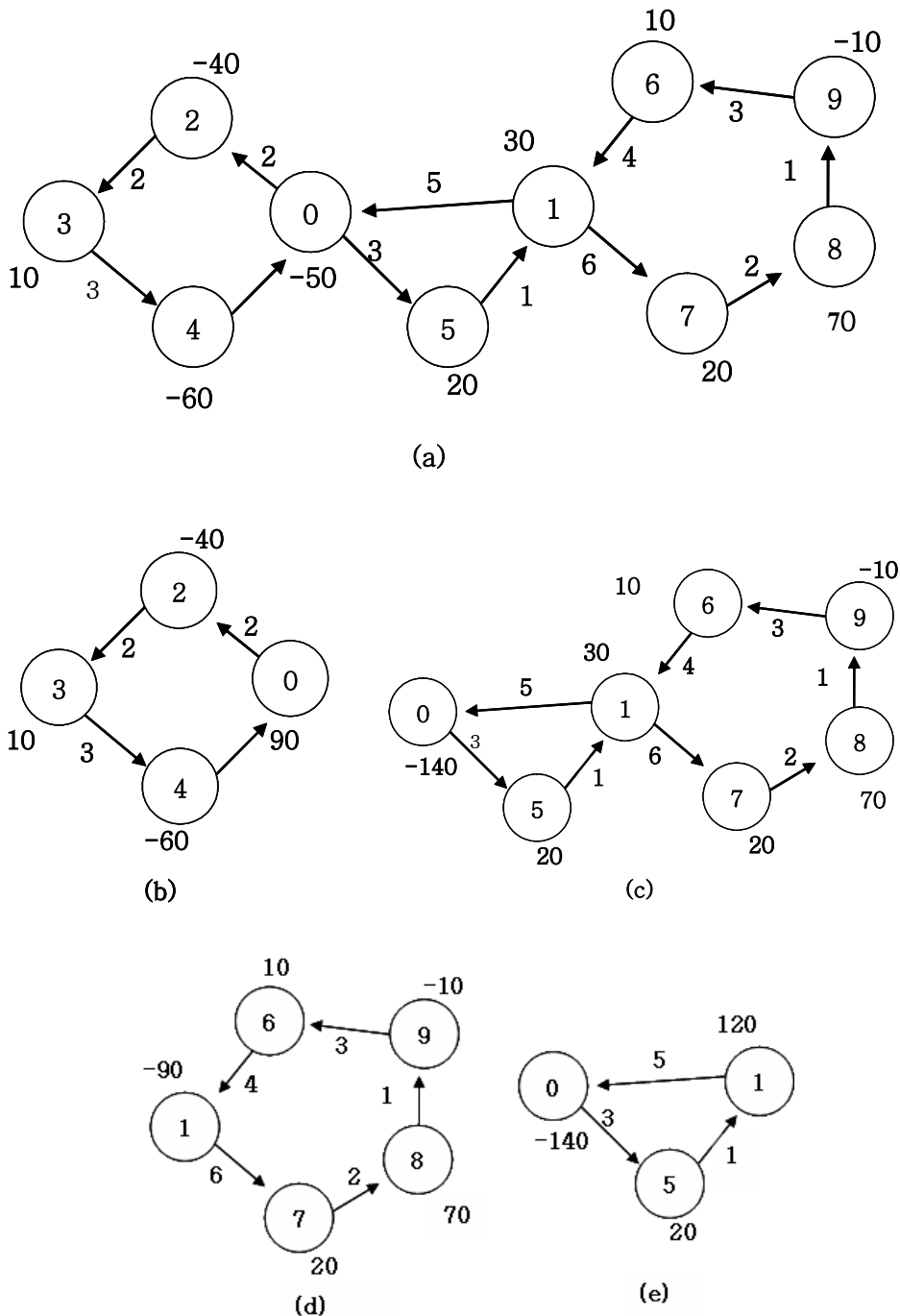


Figure 8. An illustration of OEMTUC.

끝마디 슈퍼 노드를 선택하고, 슈퍼 노드 상의 v_i 값을 다 합하여 빈 장비의 불균형을 계산한다. 총 빈 장비의 불균형을 u 로 나타낸다. u 만큼 연결 노드의 v_i 값을 감소시킨다. OEMTUC를 적용하여 슈퍼 노드 내에서 최적의 빈 장비 흐름을 구한다.

단계 3: 단계 2에서의 슈퍼 노드 내의 연결 노드를 제외하고

슈퍼 노드에서 모든 원래 노드를 제거한다. 연결 노드의 v_i 를 u 로 바꾸고 단계 1로 간다.

Property 6: OEMMHT 절차는 트리와 단방향 사이클의 혼합 네트워크 상에서 최적의 빈 장비 흐름량을 결정한다. 그리고 그 결과 얻어지는 각 호에서의 흐름량은 모든 가능해에서의

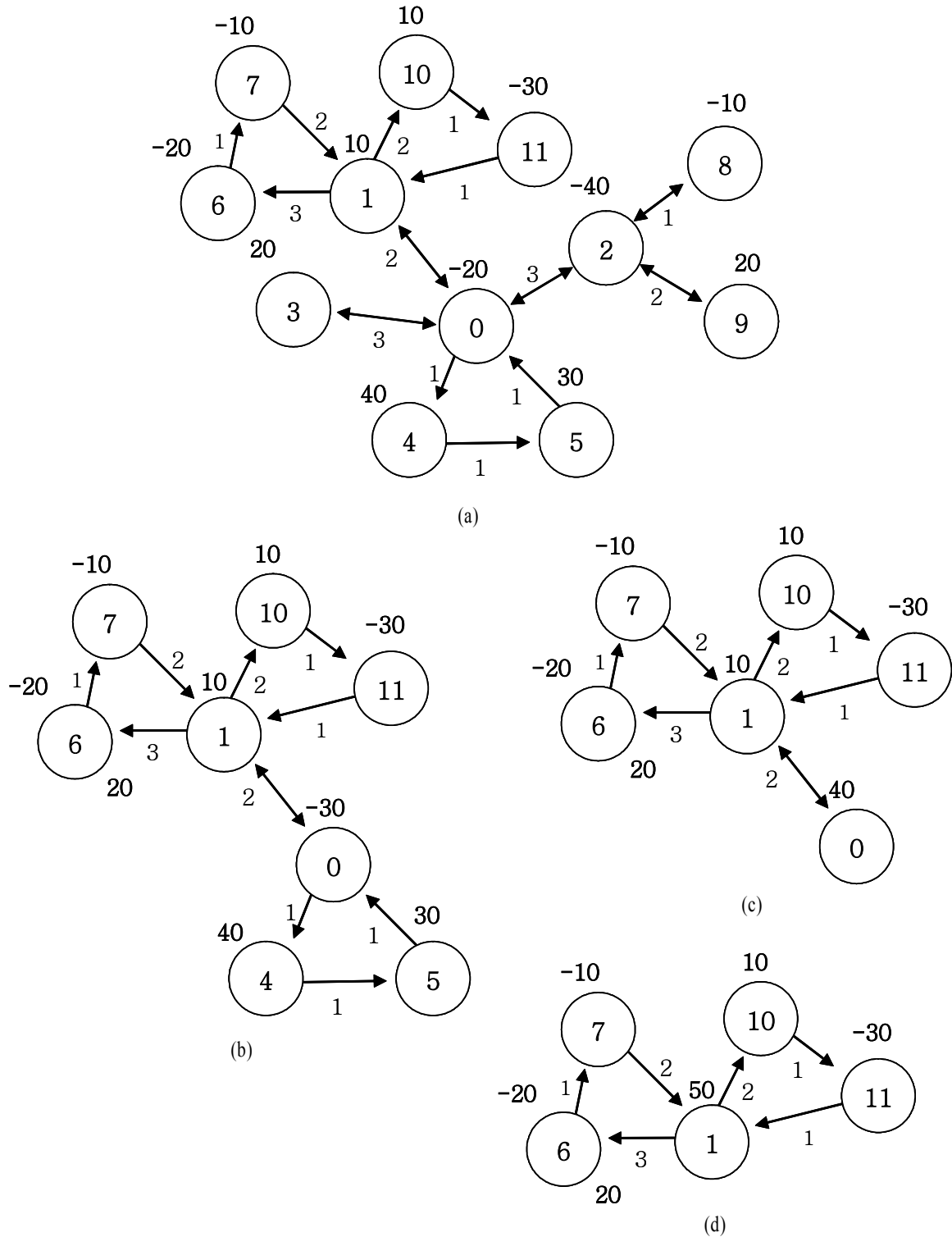


Figure 9. An illustration of OEMHT.

각 호 상의 흐름량 중에서 최소이다.

(증명) 끝마디 노드를 인접 노드에 합치고 나면 단방향 사이클로 이루어진 트리가 큰 트리 상의 노드 역할을 하는 네트워크로 된다. 우선 단방향 사이클로 이루어진 트리(슈퍼 노드) 상에서 최소 총 수송거리를 주는 흐름과 각 호 상의 최소 흐름량을 주는 흐름은 OEMTUC에 의해서 구해진다. 그 결과 슈퍼 노드 대신 그 슈퍼 노드의 연결 노드만 남게 된 트리가 만들어진 다. 이 트리는 다시 OEMT 절차에 의해서 최적해가 구해지고 그 결과 얻어지는 흐름은 최소 총 수송거리 흐름이라는 조건과 각 호 상의 최소 흐름량이라는 조건을 만족한다 증명 끝.

다음에 OEMHT 절차를 예시하겠다. <Figure 9>의 (a)와 같은 혼합 네트워크 상에서 빈 장비의 흐름을 최적화하는 문제를 풀어 보자.

단계 1: N_3, N_2, N_9, N_8 를 N_0 까지 모아 올린다. $R_{30} = 20, R_{28} = 10, R_{92} = 20, R_{02} = 30. TC = 20 \times 3 + 20 \times 2 + |-10| \times 1 + |-30| \times 3 = 200.$ 그 결과 <Figure 9>의 (b)처럼 그래프가 바뀐다. 더 이상 끝마디 노드가 없다.

단계 2: 끝마디 슈퍼 노드 하나를 선택한다. N_0, N_4, N_5 로 이루어진 사이클을 선택하였다고 하자. 이 슈퍼 노드에 대해서 빈 장비 최적흐름을 계산한다. 이 사이클의 기준점은 N_4 이다. 이때 $TC = 200 + (40 \times 1 + 70 \times 1) = 310.$ 그 결과 <Figure 9>의 (c)처럼 그래프가 바뀐다.

단계 1: N_0 를 모아 올린다. $R_{01} = 40. TC = 310 + (40 \times 2) = 390.$ 그 결과 <Figure 9>의 (d)와 같은 그래프를 얻는다.

단계 2: 마지막 슈퍼 노드를 선택하여 최적의 빈 장비 흐름을 계산한다. $R_{16} = 30, R_{67} = 10. TC = 390 + \{(30 \times 3) + (10 \times 1)\} = 490. R_{1(10)} = 20, R_{10(11)} = 30. TC = 490 + \{(20 \times 2) + (30 \times 1)\} = 560.$

7. 결론

수송 네트워크 상의 수송센터에서 빈 장비의 수요에 균형이 취해지지 않는 경우에는 빈 장비의 재배치가 필요하다. 즉, 장비의 유입이 유출보다 많을 때는 과잉장비를 다른 곳으로 내보낼 필요가 있고, 장비의 유출이 유입보다 많을 때에는 다른 센터로부터 빈 장비를 받아들이 필요가 있다.

본 연구에서는 수송 네트워크가 체인, 트리, 사이클 그래프, 그리고 이들 그래프들의 혼합형태인 그래프들로 나타나는 경우, 기존의 다품목 최소비용 흐름문제(multi-commodity minimum cost flow problem)를 위한 해법을 사용하는 대신 간단환 절차를 사용하여 최적 흐름을 구할 수 있음을 보여주었다

본 연구에서는 단순화된 수송 네트워크를 대상으로 최적화 해법을 제시하였지만 본 연구의 결과를 바탕으로 실무적인 자료를 활용하여 실제적인 사례연구를 해 볼 필요가 있다. 특히, 본 연구에서 가정한 네트워크와 실제적인 네트워크가 얼마나

차이가 있는지에 대한 조사도 의미 있다고 할 수 있다. 그리고 본 연구에서는 운반수요가 확정적이고 변하지 않는다고 가정하였으나 수송수요가 불확실하고 시간에 따라 변하는 경우와 관한 연구도 필요하다고 할 수 있다.

참고문헌

- Abrache, J., Crainic, T. G., Gendreau, M. (2001), A New Decomposition Algorithm for the Deterministic Dynamic Allocation of Empty Containers, <http://www.crt.umontreal.ca/~theo/articles.html>.
- Crainic, T. G., Dejax, P., and Delorme, L. (1989), Models for Multimode Multicommodity Location Problems with Interdepot Balancing Requirements, *Annals of Operations Research*, **18**, 279-302.
- Crainic, T. G. and Gendreau, M. (1990), *Modelling the Container Fleet management Problem using a Stochastic Dynamic Approach*, CRT-685, Centre de recherche sur les transports.
- Crainic, T. G., Gendreau, M., Soriano, P., Toulouse M. (1993a), A Tabu Search Procedure for Multicommodity Location/Allocation with Balancing Requirements, *Annals of Operations research*, **41**, 359-383.
- Crainic, T. G., Gendreau, M., and Dejax, P. (1993b), Dynamic and Stochastic Models for the Allocation of Empty Containers, *Operations Research*, **41**(1), 105-125.
- Crainic, T. G. and Delorme, L. (1993c), Dual-Ascent Procedures for Multicommodity Location-Allocation Problems with Balancing Requirement, *Transportation Science* **27**, 90-101.
- Crainic, T. G. and Laporte, G. (1997), Planning Models for Freight Transportation, *European Journal of Operational Research* **97**, 409-438.
- Daganzo, C. F. and Smilowitz, K. R. (2000), Asymptotic Approximation for the Transportation LP and Other Scalable Network Problems, *Working paper*, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley.
- Dejax, P. J. and Crainic, T. G. (1987), A Review of Empty Flows and Fleet Management Models on Freight Transportation, *Transportation Science* **21**, 227-247.
- Du, Y. and Hall, R. (1997), Fleet Sizing and Empty Equipment Redistribution for Center-Terminal Transportation Networks, *Management Science*, **43**(2), 145-157.
- Gen, M. and Cheng, R. (1997), *Genetic Algorithms and Engineering Design*, John Wiley & Sons, New York.
- Gedron, B. and Crainic, T. G. (1997), A Parallel Branch-and Bound Algorithm for Multi-commodity Location with Balancing Requirements, *Computers & Operations Research*, **24**(9), 829-847.
- Hall, R. W. (1999), Stochastic Freight Flow Patterns: Implications for Fleet Optimization, *Transportation Research A* **33**, 449-465.
- Lai, K. K., Lam, K. K. and Chan, D. (1995), Shipping Container Logistics and Allocation, *Journal of the Operational Research Society* **46**, 687-697.
- Shen, W. S. and Khoong, C. M. (1995), A DSS for Empty Container Distribution Planning, *Decision Support Systems* **15**, 75-82.