2016 년도 한국철도학회 추계학술대회 논문집 KSR2016A017

수송문제를 활용한 공화차 배분 최적화 모형

Status of Empty Freight Car Operation

박범환*, 김영훈**

Bum Hwan Park *, Young-Hoon Kim **

Abstract Recently, in the rail freight transportation, the number of the dedicated trains to the shippers has been increasing. The dedicated trains, which mean are run by the contract with shipper, had been restricted to transporting containers, so called block trains. Nowadays such a commodity is extended to cement, hard coal and etc. Most amounts of full freight cars are transported by the dedicated trains. But for empty car distribution, its efficiency still remains questionable because the distribution plan is being manually developed by dispatchers. In this study, we investigated the distribution models stated in the KTOCS system which was developed by KORAIL but now is not being used as well as in the state-of-the-art. The models are based on the optimization model, especially network flow model. Here we suggest a new optimization model with the framework of column generation approach. The master problem can be formulated into transportation problem with additional constraints. The master problem is improved by adding a new edge between the supply node and demand node, which could be found by a simple shorted path in the time-space network.

Keywords **:** empty freight car distribution, transportation problem, optimization

초 록 최근 철도 화물 수송은 컨테이너 전세 열차뿐만 아니라 시멘트, 철강 등 일반 화물의 전용열차 수가 증가하고 있고, 이에 따라 영차 수송 계획은 점차 단순해 지고 있다. 반면에 공화차 수송은, 수송 계획 최적화 시스템의 부재로, 상당한 수의 근거리 열차 및 집결 수송 방식, 그리고 사령의 경험에 의해 공화차 배분을 시행하고 있으며, 이의 효율성 여부는 검증된 바 없으며, 공화차 배분을 위한 별도의 의사결정지원시스템의 필요성은 여전하다. 본 연구에서는 연구 문헌상의 공화차 배분 최적화 모형뿐만 아니라 2010년 전후로 개발 되었다가 최근 사용이 중단된 화물열차 최적화시스템(KTOCS)상의 공화차 배분 최적화 모형을 비판적으로 살펴본 후, 수송 문제를 활용한 새로운 공화차 배분 최적화 모형을 제시하고자 한다. 이 최적화 모형은 기존 모형과 달리, 추가 제약이 있는 수송문제에 포함되는 아크를 동적으로 생성해내는 열생성 기법에 기초하고 있다..

주요어 : 공화차 배분, 수송문제, 최적화

1. 서 론

한국철도공사는 2010년 철도화물 수송의 효율화 및 예약제 도입을 위한 화물수송최적화시스템(KTOCS)을 도입하였다. KTOCS 시스템은 아래 그림과 같이 철도 화물의 중장기 수요 예측을 위한 화물운송계획 모듈, 수요를 처리하기 위한 최적의 화물열차 구성을 위한 화물

* 교신저자: 한국교통대학교 철도경영물류학과 박범환(beomi72@hanmail.net)
** 한국철도기술연구원 물류시스템연구실

열차계획 모듈, 영차/공차의 열차 별 역별 배분을 위한 화물관제 모듈, 마지막으로 철도 화물 수송 물량의 예약제 변환을 위한 화물예약관리 모듈 등으로 구성되어 있다[1]. 이 중에서도 철도 화물 수송의 효율성과 직접적인 연관을 맺는 모듈은 영차/공차의 열차 별, 역별 배분을 위한 화물관제 모듈로서, 일반적으로 이러한 모형을 화차 배분(freight car distribution)문제라고 한다. 아래 그림은 KTOCS 시스템 상의 네 가지 모듈의 화면을 보여주고 있다.

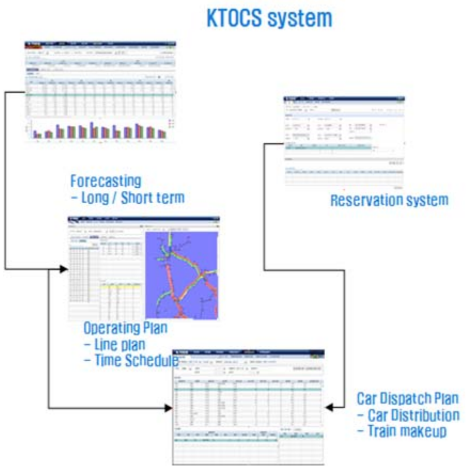

Fig. 1 KTOCS system –User Interfaces of main modules

KTOCS 시스템은 시스템의 불완전성으로 인해 현재 사용하고 있지 않으며, 이와 관련한 이유로는 비현실적인 화차운용계획 및 근거리 열차 설정 등을 지적한다. 본 연구에서는 KTOCS 시스템 뿐만 아니라 기존 연구에서 다룬 화차 배분 최적화 모형을 비판적으로 검토하고, 근거리 열차 설정 기능을 포함한 공화차 배분 최적화 모형을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 기존 연구

화차의 운용 효율성을 나타내는 대표적인 지표는 ‘회귀일’이다. 회귀일이란 화물운송을 위해 발행되는 화물운송통지서가 발행된 시점부터 다음 화물운송통지서가 발행된 시점까지의 시간적 범위를 의미하는데, 쉽게 설명하면 화차가 영차에서 다시 영차, 혹은 공차에서 다시 공차가 되는 데까지 걸리는 시간을 의미한다. 이 회귀일은 화차 소요량이나 화차의 운용 효율성을 판단하는 기준으로 활용된다.

Table 1 회귀일 현황([2]에서 재인용)

구분	2010	2011	2012	2013	2014	2015
컨테이너차	1.97	1.70	1.73	1.78	1.85	1.90
시멘트조차	4.35	4.36	4.13	3.92	3.83	3.31
무개차	5.11	5.06	4.50	4.14	3.96	4.34
유개차	7.37	7.21	6.70	6.43	7.74	7.25
평판차	11.3	9.80	9.36	11.87	9.23	11.49
자갈차	15.0	19.36	17.17	19.94	21.27	17.01
유조차	8.68	10.55	12.18	13.14	9.95	7.69

회귀일을 산정하는 방식은 화물수송지침 산정식(운용차/사용차)에 의해서도 할 수 있지만, 실제 화차의 운송 프로세스별 소요시간을 이용하여 계산하는 것이 가장 정확하다고 볼 수 있다. 하오근 등(2013)[3]은 운송 프로세스별 소요시간을 측정하여, 화물수송지침 산정식과 화차 중장기 소요판단 시 적용되어 온 목표 조정 회귀일과의 비교분석을 수행하였다.

회귀일 외에도 화차의 운용 효율을 측정할 수 있는 다양한 지표들이 개발되었는데, 김경태 등(2010)[4]은 공화차와 영차의 운행 비율에 따른 화차의 운용효율성 지표를 제시하였고, 김경태 등(2012)[5]은 량당 수송횟수, 량당 수송거리, 량당 수송수입 등의 화차 효율성 지표를 제시하고 그것들의 장단점 및 이 지표에 따른 화차종별 운영 효율성을 제시하였다.

외국 연구의 경우, 화차 운용 효율성은 주로 중간 입환역에서의 재분류 비용(reclassification)을 얼마나 줄이느냐에 달려 있어, 대부분의 관련 연구는 Blocking문제에 집중되고 있다[6,7]. Blocking 문제는 중간 입환역에서의 재분류 작업이 없는 화차의 묶음(block)을 설정하는 문제로서 한국에서 사용하는 Block Train이라는 개념과는 다른 의미로 쓰인다.

화차 배분 문제와 관련해서 대표적인 연구는 [8]과 [9]를 들 수 있는데, 두 모형 모두 네트워크 흐름(network flow) 모형을 활용하였다는 공통점이 있지만, 적용된 최적화 모형은 상이하다.

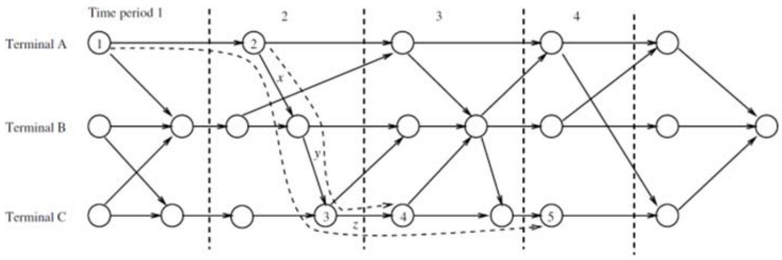

Fig. 2 Network flow model for distributing the empty cars [8]

Joborn et al.(2004) [8]은 Fig. 2와 같은 시공간 네트워크(time-space network)상의 다품종 흐름 모형을 고려하였다. 이 모형의 경우, 문제의 시간적 범위(time horizon)이 길고, 수요 공급지 노드가 많을 경우, 문제 크기가 매우 커지는 단점이 있다. KTOCS 시스템에서도 네트워크 구성에 있어 약간의 차이가 있지만 시공간 네트워크상에서 다품종 흐름을 다룬다는 측면에서 유사한 모형이라 볼 수 있다.

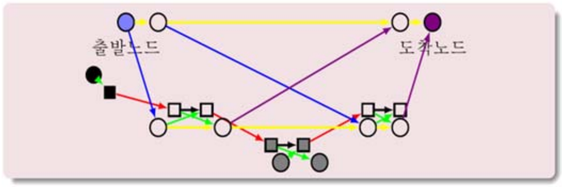

Fig. 3 Network flow model applied to KTOCS system [1]

반면에 Narisetty et al.(2008) [9]은 공화차 배분 모형을 단순화하여, 공화차 여유분이 있는 시공간적 지점을 공급지, 공화차가 필요한 시공간적 지점을 수요지로 한 수송 문제(transportation)로 정형함으로써, 문제 크기를 축소하였다. 그러나 각 수요-공급 쌍에 대해 가능한 모든 수송 경로를 찾아야 하는 단점이 있으며, 가장 결정적인 모형의 단점은 열차의 수송 용량을 고려할 수 없다는 것이다. 열차 수송 용량은 충분하다고 간주하고 있지만, 이는 한국 철도 상황과는 차이가 있다.

다음 절에서는 위 두 모형에서 제시한 두 가지 모형을 결합하여, 수송문제를 주문제로 설정하고, 새로운 수요-공급 쌍에 대해 새로운 경로를 동적으로 생성하는 열생성 기반의 새로운 최적화 모형을 제시하고자 한다. 뿐만 아니라 이 모형의 경우, 근거리 열차 설정 여부를 동시에 판단할 수 있도록 열차 설정에 따른 고정 비용을 고려하였다.

2.2 근거리 열차 설정을 고려한 공화차 배분 최적화 모형

2.2.1 최적화 모형 및 열생성 해법

본 연구에서는 공화차의 배분만을 다룬다. 원칙적으로 화차의 배분 계획이란 영차의 열차 별 배분 및 공화차의 열차 별 역 별 배분을 모두 포함하는 것이지만, 본 연구에서는 영차의 열차 별 배분은 고려하지 않는다. 왜냐하면, 최근 블록 트레인에 의해 수송되는 컨테이너 뿐만 아니라, 최근 일반화물(시멘트, 철강, 석탄 등)의 경우도 약 90여개의 전용 열차로 운송되고 있어, 대부분 도중 입환에 의한 연결-해방 작업 없이 수요지로부터 목적지로 직접 수송되고 있어, 영차의 배분계획은 매우 자명하다고 볼 수 있다.

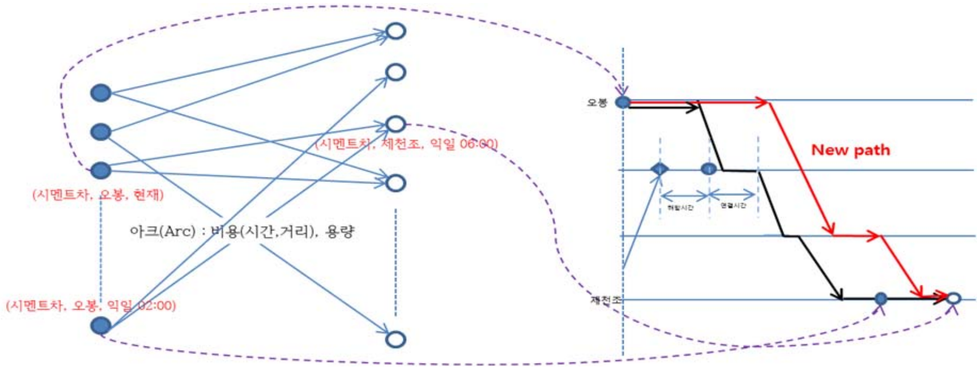

Fig. 4 Our model based on transportation problem

Fig.4는 본 연구에서 제시하는 최적화 모형을 하나의 그림으로 표현한 것인데, 먼저 왼쪽 그림은 공화차의 수급 상황에 따라 공화차의 공급 역할을 하는 시공간적 시점을 공급지, 공화차의 수요 역할을 하는 시공간적 시점을 수요지로 하는 수송문제를 모사한 것이다. 그러나 처음부터 모든 수송 가능한 경로를 수송문제에 포함할 경우 모든 수송 경로를 구하는 것은 많은 시간이 소모될 뿐만 아니라, 그 경로들 중에는 실제 수송에 활용될 가능성이 거의 없는 경로까지 포함되어 있다. 본 연구에서는 수송문제에 포함되는 공급-수요지간 아크의 생성을 동적으로 하기 위해, 수송 문제 뿐만 아니라 열차의 경로를 시공간에 표현한 시공간네트워크를 동시에 고려한다. 즉 시공간 네트워크에서의 공급-수요지간 경로는 수송문제의 아크에 대응시킨다. 이러한 대응 관계 및 수송문제의 목적함수를 개선시킬 수 있는 의미 있는 경로만을 찾는 가장 효과적인 방법이 바로 열생성(column generation) 방법이다. 최적화 모형 정의를 위해 아래와 같은 수학적 용어를 활용한다.

<u>용어</u>

- 네트워크 $G = (S \cup D, E)$: 수송문제의 이분(Bipartite network) 네트워크
- 시공간 네트워크 $\bar{G} = (V, A)$: V는 열차의 연결 혹은 해방 지점, $a \in A$는 화차의 연결 해방 구간 혹은 대기 시간을 의미함
- $v(i)$: G상의 i 에 대응되는 시공간 네트워크 상의 노드 ($i \in G, v(i) \in \bar{G}$)
- a의 속성 : $(C_a, t(a), h(a), tr(a))$ = (운행시간, tail, head, 열차번호)
- c_e : 공급지와 수요지 간의 총 운송비용(시간). $e = (i,j) \in E \ (i \in S, j \in D)$
- c_a : $a \in \bar{G}$의 총 운송 비용(시간).
- P_{vw} : 시공간 네트워크에서 v와 w사이의 경로의 집합
- s_i:노드 i의 공급량
- d_j : 노드 j의 수요량
- T : 모든 열차의 집합
- T_{temp} : 운행 여부를 결정해야 하는 비정기 근거리 열차의 집합
- L_t : 열차 t가 지나는 레그 집합
- C_l^t : 열차 t의 레그 l의 여유수송용량(화차수), $t \in T$
- f_t : 열차 t 운행에 필요한 고정 비용, $t \in T_{temp}$
- $\Gamma(l)$: 레그 l을 이용하는 e의 집합
- T_e : e가 사용하는 열차의 집합

<u>결정변수</u>

- y_t : 열차 t를 운행하면 1, 그렇지 않으면 0 ($t \in T_{temp}$)
- x_e : 아크 e상의 흐름량(화차수) $e = (i,j) \in E \ (i \in S, j \in D)$

위 용어와 결정변수를 이용하여 공급지-수요지간 최적의 공화차 배분을 결정하기 위한 수송문제는 다음과 같다. 아래 모형은 수요지의 수요량 제약과 공급지의 공급량 제약만 있는 일반적인 수송 문제에 열차 수송용량 제약이 추가된 추가제약이 있는 수송문제가 된다. 먼저 첫번째 목적함수는 공화차 이동에 따른 가변비용과 근거리 열차 설정에 따른 고정 비용이 합으로 구성되어 있으며, 첫 번째 제약식과 두 번째 제약식은 공급지에서의 공급량 제약과 수요지에서의 수요량 제약에 각각 해당된다. 마지막 두 개의 제약식은 특정 열차를 이용하는 모든 공급지-수요지간 아크(e)의 흐름량을 더했을 때, 그 열차의 통과 레그별 용량을 넘어설 수 없다는 제약식을 의미한다.

주문제(master problem)

$$
\begin{aligned}
\min \quad & \sum c_e x_e + \sum_{t \in T_{temp}} f_t y_t \\
s.t. \quad & \sum_{e \in A(i)} x_e \le s_i, \ \forall i \in S \quad : \pi_i \\
& \sum_{e \in B(j)} x_e \ge d_j, \ \forall j \in D \quad : \pi_j \\
& \sum_{e \in \Gamma(l)} x_e \le C_l^t \ , \ \forall l \in L_t, \ \forall t \in T / T_{temp} \quad : \sigma_l^t \\
& \sum_{e \in \Gamma(l)} x_e \le C_l^t \cdot y_t \ , \ \forall l \in L_t, \ \forall t \in T_{temp} \quad : \sigma_l^t \\
& x_e \ge 0, \ y_t \in \{0,1\}
\end{aligned}
$$

앞에서 서술했듯이 위 추가제약이 있는 수송문제는 공급지-수요지간 경로를 의미하는 모든 아크를 포함하지 않고, 일부 경로 혹은 가상의 무한대의 공급능력을 갖는 공급지로부터 모든 수요지까지의 경로가 있다고 가정한 무한대의 비용을 갖는 아크들 만으로 구성된 수송문제를 구성한 후, 쌍대 문제의 가능해 조건을 통해 목적함수를 개선할 수 있는 새로운 공급지-수요지간 경로를 수송문제에 추가할 수 있다. 열생성 기법에서는 수송문제와 같은 역할을 하는 문제를 주문제(master problem)라 하고, 주문제에 추가되는 새로운 열(column)을 추가하기 위해 풀어야 하는 문제를 부문제(sub problem)이라 한다. 부문제 구성을 위해 위 주문제의 쌍대 가능 조건을 서술하면 아래와 같다.

$$
-\pi_i + \pi_j - \sum_{t \in T(e)} \sum_{l \in L_t} \sigma_l \le c_e \quad \forall e = (i,j) \in E
$$

따라서 위 쌍대 가능 조건을 위배하는 e가 존재하는지를 탐색하기 위해 e의 공급지 i에서 수요지 j까지 새로운 경로를 탐색한다. 이 때 새로운 경로는 수송문제에서의 네트워크가 아닌 열차 스케줄을 표현한 시공간 네트워크 $\bar{G} = (V, A)$를 의미한다.

$$
c_e + \pi_i - \pi_j + \sum_{t \in T(e)} \sum_{l \in L_t} \sigma_l = \sum_{a \in p} (c_a + \sigma_a) + \pi_i - \pi_j < 0
$$

결국, 시공간 네트워크에서 열차의 경로상에 존재하는 아크에 대해서 $c_a + \sigma_a$의 비용을 설정하고 i-j간 최단 경로를 계산했을 때 그 경로 비용이 $\pi_j - \pi_i$보다 크면 더 이상의 경로가 필요없고, 그렇지 않으면, 그 경로는 주문제를 개선시킬 수 있는 경로가 된다. 더 이상의 추가 경로가 나오지 않으면 주문제의 선형 완화식의 최적해를 찾은 것이고, 이 선형 완화식을 다시 정수계획 모형으로 변경하고 분지한계법을 적용하여 해를 구한다.

2.2.2 해법 검증

본 절에서는 위에서 서술한 최적화 모형 및 해법이 어떻게 구현되는지, 그리고 그 해법이 제대로 작동하는지를 확인하기 위해 작은 예제에 대한 실험결과를 제시한다. 본 절에서 다루는 예제는 3개의 열차(이 중에 1개의 열차가 근거리 임시 열차), 3개의 화물 취급역, 각 역의 공화차 수급상황에 따른 2개의 공급지와 3개의 수요지로 구성된다. 먼저 공급지와 수요지를 이용한 수송문제는 Fig. 5와 같다. 여기서 artificial node는 가상의 노드로 모든 수요지의 공화차 수요를 공급해주고 공급에 필요한 비용은 무한대인 노드를 의미한다.

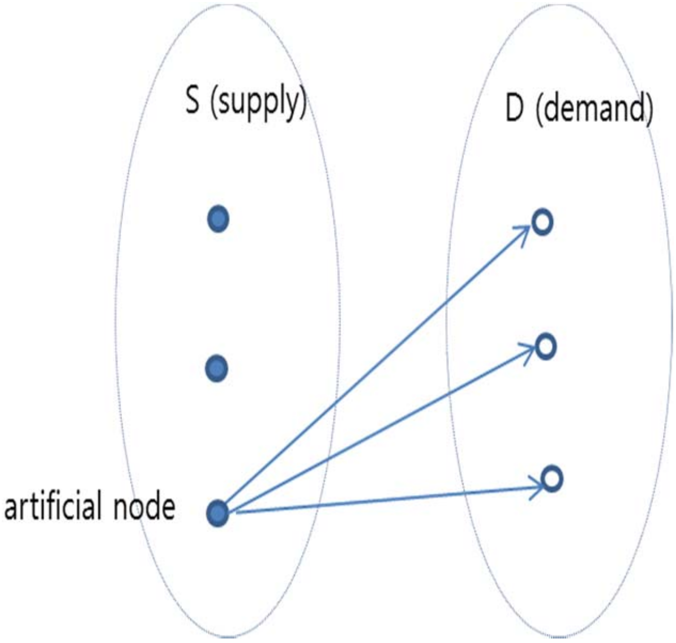

Fig. 5 Initial transportation model

이렇게 구성된 수송문제를 풀어 쌍대해를 구한 후, 새로운 경로를 계속 추가하고, 더 이상의 경로가 발견되지 않을 때까지 이를 반복한다. 이 때 새로운 경로를 찾기 위해 활용되는 시공간 네트워크는 아래와 같다.

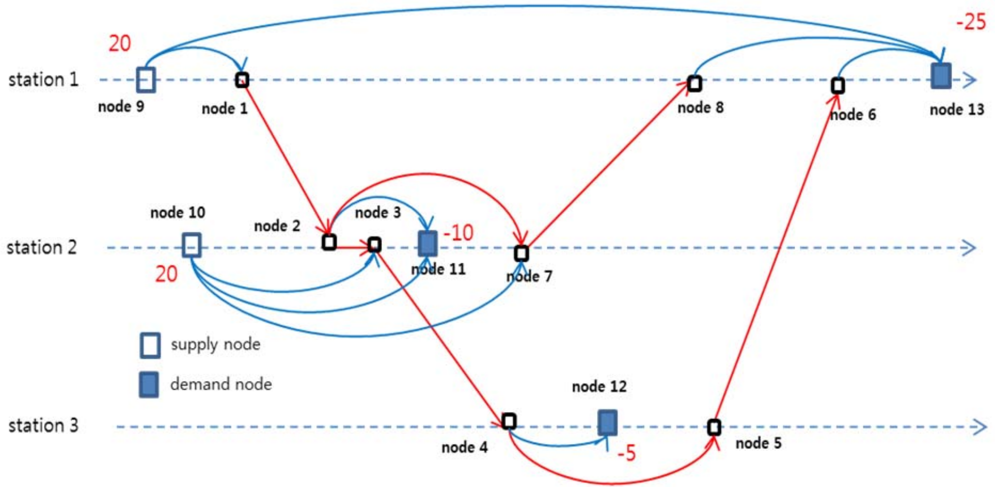

Fig. 6 Time space network

Fig. 7은 두 개의 가능해를 보여주고 있는데, 첫번째 해는 근거리 열차를 이용한 공화차배분계획이고, 나머지 하나는 최적화 모형을 통해 계산된 공화차배분 결과이다. 그림에서 보듯이, 최적해에서는 근거리 열차를 설정하는 대신에, station2에 있는 공화차를 station3로 옮긴 후, 다시 station 1으로 이동하는 과정을 밟아 운행 거리가 늘어났음을 확인할 수 있다.

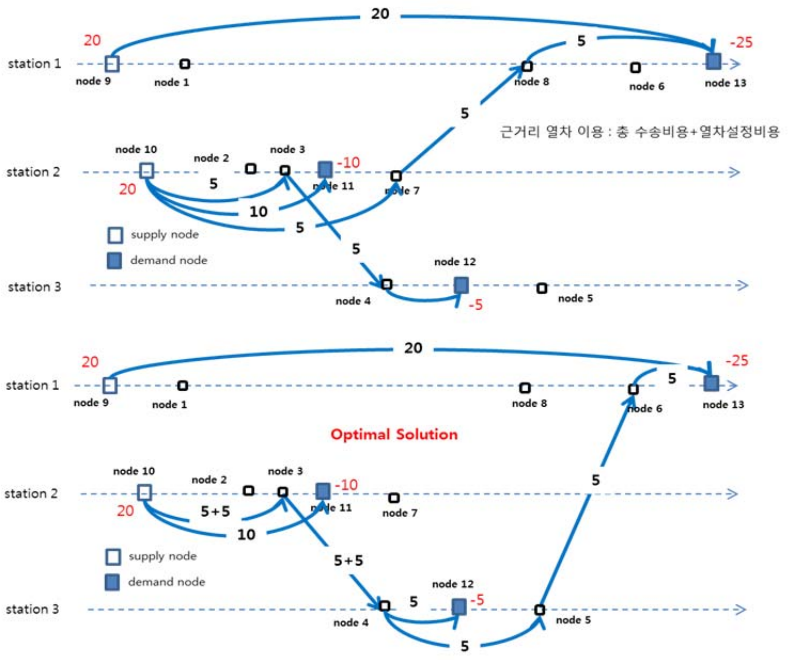

Fig. 7 Two feasible solutions

참고문헌

[1] KORAIL (2009), 화물수송 최적화 시스템 구축 사업 중간 보고서

[2] 이용복(2016), 사물인터넷 도입이 철도화차의 운용효율성에 미치는 영향에 관한 연구, *우송대학교 박사학위논문*

[3] 하오근, 김기춘, 공현덕, 최성필 (2013), 화차소요량 판단의 객관성 확보를 위한 적정 회귀일 산정, 한국철도학회 추계 학술발표대회논문집, pp. 108-115

[4] 김경태, 권용장, 김영주 (2010), 철도화차의 공차운행 분석, 한국철도학회 춘계 학술발표대회논문집, pp. 1542-1548

[5] 김경태, 이석, 권용장, 김영주(2012), 철도화차의 효율성 지표 분석에 관한 연구, 한국철도학회논문집 15(3), pp. 272-277

[6] R. K. Ahuja, K.C. Jha, and Jian Liu (2007). Solving real-life railroad blocking problems, Interfaces, 37(5), pp.404-419

[7] H. N. Newton, C. Barnhart, and P. H. Vance, Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs, Transportation Science, 32:330-345, 1998.

[8] M. Joborn, T. G. Crainic, M. Gendreau, K. Holmberg and J. T. Lundgren (2004), Economies of Scale in Empty Freight Car Distribution in Scheduled Railways, *Transportation Science*, 38(2), pp. 121-134.

[9] A. K. Narisetty, J. P. Richard, D. Ramcharan, D.M. Murphy, G. Minks and J. Fuller (2008), An Optimization Model for Empty Freight Car Assignment at Union Pacific Railroad. *Interfaces*, 38(2), pp. 89-102.