

■ 論 文 ■

Hub-and-spoke 운송전략을 고려한 철도화물서비스 네트워크디자인모형의 개발

A Service Network Design Model
for Rail Freight Transportation with Hub-and-spoke Strategy

정 승 주

(교통개발연구원 책임연구원)

목 차

- | | |
|-------------------------|----------------|
| I. 서론 | 2. 운송경로 결정알고리즘 |
| II. 모형 | IV. 적용 및 평가 |
| 1. 문제의 정의 및 기본가정 | 1. 테스트문제의 설정 |
| 2. 결정변수 및 비용구조 | 2. 알고리즘의 평가 |
| 3. 모형의 수식화(formulation) | V. 결론 |
| III. 알고리즘의 개발 | 참고문헌 |
| 1. 서비스빈도 개선알고리즘 | |

Key Words : 철도화물, Hub-and-spoke, 운송망, 서비스네트워크디자인, 휴리스틱 알고리즘

요 약

Hub-and-spoke운송은 교통분야에서 널리 이용되고 있는 운송전략의 대표적 개념이다. 화물의 컨테이너화와 환적기술의 발달로 최근 유럽을 중심으로 철도화물운송부문에서도 이 운송전략의 적용사례가 나타나고 있다. 이에 본 연구는 Hub-and-spoke운송전략을 구현하는 철도화물서비스네트워크 디자인모형을 제시하고, 대규모 운송망에도 적용이 가능한 효율적 알고리즘을 개발하였다.

개발되는 모형이 전략적 수준의 계획모형임에도 불구하고 모형에서는 일반화된 운영비용 외에 열차속도, 서비스빈도, 터미널에서의 화물처리속도 등에 따른 시간지체비용도 고려되었다. 시간지체비용의 고려에 따라 야기되는 목적함수의 비선형성은 빈도별 서비스결정변수의 설정을 통해 선형최적화문제로 표현되었다. 규모가 큰 네트워크의 경우 해도출의 어려움 때문에 본 논문은 전체문제의 분할(decomposition)에 기초한 휴리스틱방법(heuristic method)으로 문제를 해결하고자 하였다. 해도출의 효율성을 높이기 위해 서비스빈도개선과 관련하여 3개의 알고리즘이 개발되었고, 개발된 알고리즘은 유럽의 실제네트워크를 기초로 도출한 4개의 테스트문제를 대상으로 해의 정확도와 해 도출의 효율성이 비교·평가되었다.

1. 서론

Hub-and-spoke운송전략은 운송망 내의 모든 또는 대부분의 물량을 거점터미널(허브)에 연계하여 수송케 함으로서 물량이 소량이고 불규칙하게 발생하는 O-D구 간에 대해 규칙적이고 보다 높은 빈도의 운송서비스를 제공할 수 있게 한다. '80년대 이후 Hub-and-spoke 전략은 항공을 시작으로 해운, 공로 등 교통 전 분야에서 널리 이용되고 있다. 그러나 철도의 경우 네트워크의 폐쇄성과 융통성 부족 등 수단적 특성으로 인해 그 적용사례를 찾기는 어려웠다. 그러다 90년대 초부터 정부의 철도활성화정책과 환적처리기술의 발달로 유럽에서는 철도를 이용하는 복합운송화물에 대해 Hub-and-spoke운송전략이 활발히 적용되고 있다. 프랑스의 경우 SNCF(Société Nationale des Chemins de Fer français, 국영철도회사)의 철도-공로 복합운송 자회사인 CNC(Compagnie Nouvelle de Conteneurs)는 파리를 허브로 하여 서비스를 제공하고 있다(Niérat, 1998).

그러나 철도화물운송망에서의 Hub-and-spoke운송 전략을 이론적으로 검증하고 그 적용성을 평가하는 연구작업은 매우 미약한 형편이다. 이 전략을 활용하고 있는 일부 유럽의 철도-공로 복합운송업체도 이론화된 모형을 통해 검증하기보다는 전략적 차원의 결정으로 추진하여 왔다. Hub-and-spoke운송은 철도운송서비스의 한 형태이므로 운송전략을 분석하고 평가하기 위해서는 결국 서비스네트워크디자인문제로 모형화하는 것이 요구된다. 비록 Hub-and-spoke운송전략을 거의 다루지 않았으나, 철도화물운송부문에 열차서비스의 배정과 물량의 운송경로를 결정하는 철도서비스네트워크디자인에 관한 기존연구는 비교적 활발히 이루어져 왔다. 철도서비스네트워크디자인모형은 열차구성과 열차서비스경로를 결정하는 모형을 제시한 Assad(1980)로부터 시작되었다. 이후 철도서비스네트워크디자인모형은 블록(bloc)계획, 열차구성(train formation)계획 등 관련문제를 추가하여 모형의 통합(Crainic et al. (1984, 1986), Keaton (1989, 1992), Marín and Salmerón(1996a, 1996b)을 시도하거나 수요의 동적 특성이나 공화차 등 특정요소를 고려(Haghani(1989), Touati (1996))하는 방향으로 발전되어 왔다.

최근 거의 유일하게 EU차원에서 수행된 철도화물관련 R&D연구사업(INRETS(2000))에서 제시된 모형

(SIMIQ)이 Hub-and-spoke운송서비스를 고려하였으나, 이 모형 역시 허브입지의 결정을 주목적으로 하고 있어 Hub-and-spoke운송서비스의 다양한 측면을 고려하고 있지 못하다. 더욱이 Hub-and-spoke운송망은 기본적으로 다수의 출발지와 목적지로 구성되는 특성 때문에 개발되는 모형은 대규모네트워크를 쉽게 해결할 수 있어야 한다는 점도 매우 중요하나, SIMIQ의 경우 28개 노드를 가진 중규모의 네트워크에 적용되는 한계를 지니고 있다.

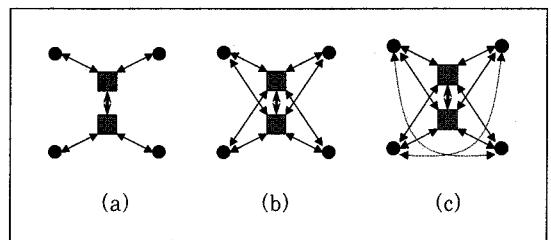
이에 본 연구는 철도화물의 경쟁력 제고를 위한 대안으로 대두되고 있는 Hub-and-spoke운송전략을 고려하는 서비스네트워크디자인모형을 제시하고 운송전략의 특성상 대규모 운송망에도 효율적으로 적용될 수 있는 알고리즘을 개발하는 데 목적이 있다. 개발된 모형은 유럽의 실제 운송망에 기반하는 실험네트워크에 적용되어 알고리즘의 효율성과 실제 철도운송망에 대한 Hub-and-spoke운송전략의 적용가능성을 평가하고 시사점을 제시한다.

II. 모형

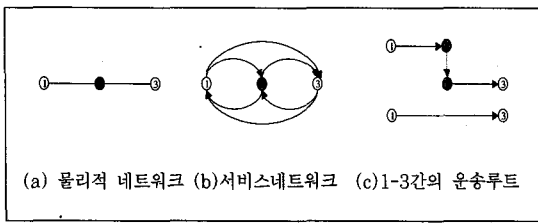
1. 문제의 정의 및 기본가정

기본적으로 Hub-and-spoke운송전략은 모든 서비스가 허브에 연결되나 O-D간 물량이 충분한 경우 굳이 허브를 거쳐 수송될 필요는 없다. 이와 같이 O-D간 직송서비스를 허용할 경우를 혼합전략(mixed strategy)이라 한다. 이는 모든 서비스가 허브와 연결되어야 하는 순수전략(pure strategy)에 비해 보다 융통성 있는 전략이다. 본 연구에서는 모델의 적용성과 실용성을 증대하기 위해 Hub-and-spoke운송전략 중 혼합전략의 경우(〈그림 1〉의 (c))를 상정한다.

Hub-and-spoke운송서비스망을 구성하는 결정요소



〈그림 1〉 Hub-and-spoke 운송망구조



〈그림 2〉 Hub-and-spoke운송망의 구성개념

는 서비스(구간 및 빈도)와 서비스를 이용하는 O-D물량의 운송경로를 들 수 있으며, 이를 일반적으로 서비스네트워크디자인문제라 한다. 허브입지도 포함될 수 있으나 통상 허브입지문제는 별도의 문제로 구분된다. 일반적인 서비스네트워크문제와 입지문제는 해의 도출이 어려운 NP-Hard문제로 알려져 있기 때문이다 (Magnanti and Wong, 1984). 따라서 본 연구에서는 허브입지를 결정변수로 포함하지는 않으나 완화된 허브구조(relaxed structure)를 상정함으로써, 모델의 적용 후 잠재성이 높은 허브입지를 간접적으로 제시할 수 있도록 하여 모형의 적용성을 높이고자 한다. 이를 위해 모든 터미널이 허브의 잠재적 입지로 가정된다. 이는 모든 터미널이 환적 및 분류기능을 가지며, 비록 허브터미널은 일반적으로 일반터미널에 비해 처리속도나 처리물량이 더 효율적이기는 하나 터미널의 화물처리능력 및 서비스수준이 동일하다고 상정하는 것을 의미한다.

철도선로와 역으로 구성되는 물리적 네트워크와는 달리 서비스네트워크는 서비스링크와 노드로 구성된다. 서비스네트워크는 모든 O-D쌍간의 유방향 직송서비스로 정의된다. 즉 같은 서비스링크라도 서비스방향이 다르면 다른 서비스로 정의된다. 각 O-D간 물량의 운송경로는 서비스를 이용하는 궤적으로 정의된다.

그 외 모형개발을 위해 추가적으로 몇 가지 기본적인 전제조건을 설정한다.

- 네트워크운영자(서비스 공급자)는 하나라고 가정한다. 본 연구가 제시하는 모형은 운송시장의 구조를 다루는 모형이 아니라 운송업자가 어떻게 서비스를 제공하는가를 모사하는 모형이기 때문이다.
- 모든 서비스는 직송서비스로 가정한다. 현재 유럽의 복합운송업체가 철도에서 허브서비스전략을 채택하는 경우 모든 구간에서 기본적으로 직송서비스를 제공한다는 점에서 이 전제조건은 현실적으로

매우 타당한 조건이다.

- 초기에 모든 O-D구간에 대해 서비스가 설정된다. 따라서 초기단계에서 모든 O-D는 직송으로 수송이 가능하다. 이것은 우리문제가 혼합전략도 포함함을 의미한다.
- 일반적으로 허브네트워크에서 O-D물량은 최대 2개 정도의 허브를 거친다(출발자-허브-허브-도착지). 그러나 운송망에서는 물량의 자유로운 수송 경로구조를 파악하기 위해 허브통과수가 제한되지 않는다.

2. 결정변수 및 비용구조

제시된 문제는 일정한 제약조건(서비스의 처리용량, 운송경로의 조건 등)을 충족시키면서 최소의 네트워크 비용으로 최적서비스빈도의 조합과 그를 이용하는 최적 운송경로를 동시에 결정하는 문제이다. 따라서 결정변수는 열차서비스(서비스구간 및 서비스빈도)와 O-D물량의 운송경로가 되며, 결국 목적함수는 모든 O-D물량의 운송경로비용과 열차서비스비용의 합을 최소화하는데 있다.

목적함수에서 각 결정변수와 관계되는 비용계수를 살펴보면, 먼저 O-D물량의 운송경로 결정변수와 관련된 비용은 크게 운영비용과 시간지체비용으로 구분된다. 운송경로상에서 발생하는 운영비용은 수송비용, 터미널에서의 화물취급비용을 포함한다. 시간지체비용은 열차속도에 따른 지체비용, 터미널에서 화물취급에 따라 발생하는 지체비용, 그리고 서비스빈도에 따른 지체비용을 포함한다. 운영비용은 물량으로 표현되는 운송경로 결정변수의 선형계수로 표현될 수 있다. 그러나 열차속도에 따른 시간지체비용을 제외한 터미널지체비용 및 서비스빈도관련 지체비용은 비선형계수로 표현되어 목적함수를 비선형(non-linear)으로 만드는 데, 일반적으로 비선형 최적화문제는 선형문제(linear problem)에 비해 해의 도출이 어렵다는 점 때문에 가능하다면 목적함수를 선형화하는 것이 바람직하다.

터미널지체비용은 대기행렬모형으로 표현되므로 그 대기시간은 물량과 비선형관계에 있다. 일반적으로 매일 또는 단기의 스케줄을 계획하는 모형의 경우, 터미널지체비용은 대기행렬모형에 따른 계산이 중요하겠으나 제시된 문제와 같이 전략수준의 모형에서는 그러한 미시적인 고려는 그다지 중요하지 않다. Keaton

(1992), Bodin et al.(1980) 등 몇몇 연구는 평균치를 이용하기도 한다. 본 연구에서도 평균개념을 도입하기로 한다. 이렇게 하면 터미널지체비용도 물량의 선형계수로 표현될 수 있다. 반면 서비스빈도관련 지체는 열차의 서비스수준에 직접 영향을 주는 요소이므로 지체시간을 평균치를 사용하기는 곤란하다. 서비스빈도에 따른 지체는 산술평균적 개념의 식으로 표현될 수 있다.

$$\text{서비스빈도에 따른 시간지체} = \frac{pl}{2f} \quad (1)$$

여기서,

pl : 계획기간

f : 서비스의 빈도

서비스빈도는 열차서비스 결정변수와 관련한 요소이면서 물량의 운송경로 결정변수의 비용계수에 직접 영향을 준다. 즉, 이용하는 서비스의 빈도수준에 따라 해당서비스를 이용하는 물량의 운송경로비용이 비선형적으로 변하게 된다. 그러나 동일구간의 서비스라 하더라도 빈도가 다를 경우 빈도별로 별개의 서비스로 구분하여 정의한다면 식(1)에서 f 는 상수가 되어 물량의 운송경로비용계수는 물량에 선형관계가 된다.

제시된 문제의 목적함수에서 O-D쌍 m 의 운송경로 k 의 일반화 비용계수를 cf_k^m , 운행열차가 p 형이고 서비스빈도가 f 인 서비스링크 l 의 일반화비용계수를 cs_l^{pf} 라 한다면 각 비용계수는 식(2), 식(3)과 같이 표현된다.

$$cf_k^m = \left\{ \sum_{p \in P} ct^p \cdot d_k^p + cvt \cdot th \cdot nt_k + co \cdot nt_k + (cvt \cdot pl) \sum_{p \in P} \sum_{l \in A(k)} \frac{1}{2f_l^p} + cvt \sum_{p \in P} \frac{d_k^p}{v^p} \right\} o^m \quad (2)$$

$$cs_l^{pf} = f_l^p \cdot ca^p \cdot ds_l \quad (3)$$

여기서,

cvt : 물량의 시간당 시간가치

th : 터미널에서 평균작업시간

nt_k : 운송경로 k 에서 물량의 환적이 이루어지는 터미널 수

co : 터미널에서의 톤당 물량처리비용

pl : 계획기간

ct^p : p 형 열차에 의한 톤-키로당 수송비

d_k^p : 운송경로 k 에서 p 형 열차에 의해 수송되는 구간거리

f_l^p : 서비스 링크 l 에서 p 형 열차의 서비스빈도

v^p : p 형 열차의 평균주행속도

ca^p : 비적재시 p 형 열차의 열차-키로당 일반화비용

ds_l : 서비스링크의 구간거리

$A(k)$: 운송경로 k 를 구성하는 서비스링크의 집합

o^m : (O-D)쌍 m 의 물량

P : 적재용량으로 차별화되는 열차형태 p 의 집합

식(2)의 { }에서 첫째 항은 운송경로에서 발생하는 수송비를 의미한다. 둘째항과 셋째항은 운송경로상에 존재하는 터미널에서 발생하는 지체비용과 환적처리비용을 나타낸다. 넷째항은 운송경로상에서 발생하는 서비스 이용구간별 서비스빈도에 따른 시간지체비용을 나타낸다. 마지막으로 다섯째항은 열차속도에 따른 시간지체비용을 나타낸다.

3. 모형의 수식화(formulation)

제시된 문제는 운송망의 총비용(운송경로비용+열차서비스비용)을 최소화하는 선형문제로 표현된다.

$$\text{Minimise } Z(X,T) = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K(m)} cf_k^m X_k^m + \sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F(p,l)} cs_l^{pf} T_l^{pf} \quad (4)$$

$$\sum_{k \in K(m)} X_k^m = 1 \quad \forall m \in M \quad (5)$$

$$\sum_{m \in M} o^m \sum_{k \in K(m,l)} X_k^m \leq \sum_{p \in P} \sum_{f \in F(p,l)} \alpha_l^{pf} T_l^{pf} \quad \forall l \in L \quad (6)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{f \in F(p,l)} T_l^{pf} \leq 1 \quad \forall l \in L \quad (7)$$

$$X_k^m \in \{0,1\} \quad \forall k \in K(m) \quad \forall m \in M \quad (8)$$

$$T_l^{pf} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P \quad \forall f \in F(p,l) \quad \forall l \in L \quad (9)$$

여기서,

M : 모든 (O-D) 쌍 m 의 집합

- $K(m)$: (O-D) 쌍 m 에 의해 선택되어 질 수 있는 운송경로의 집합
- $K(m, l)$: $\{k \in K(m) | l \in A(k)\}$ 로 표현되는 운송경로의 집합
- L : 열차서비스 l 의 집합
- $F(p, l)$: 서비스링크 l 에서 p 형 열차에 의해 제공 가능한 빈도의 집합
- α_l^{pf} : 서비스링크 l 에서 빈도 f 를 가진 p 형 열차의 적재용량
- X_k^m : (O-D)쌍 m 이 운송경로 k 를 선택함을 나타내는 결정변수
- T_l^{pf} : 서비스링크 l 에서 빈도 f 를 가진 p 형 열차의 선택을 나타내는 결정변수

제약식(5)는 각 O-D물량이 1개의 운송경로를 선택하여야 함을 나타낸다. 제약식(6)은 서비스용량 제약식으로 서비스를 이용하는 물량의 합은 서비스용량내이어야 함을 나타낸다. 제약식(7)은 같은 서비스구간에는 1개의 서비스가 선택되어야 함을 의미한다. 제약식(8)과 (9)는 결정변수의 비음조건을 나타낸다.

III. 알고리즘의 개발

최적해의 도출이 어려운 서비스네트워크 디자인문제라는 점 외에 Hub-and-spoke운송망의 특성상 대규모 운송망에 적용해야하는 점 때문에 제시된 문제를 풀기 위해서는 휴리스틱 접근이 바람직하다. 제시된 문제는 선형문제로 2개의 하위절차로 구분할 수 있는 구조를 가지고 있다.

- 하위절차 1 : 서비스빈도 개선절차
- 하위절차 2 : 물량수송루트 결정절차

즉, 초기의 잠재적인 서비스집합(서비스빈도)을 설정한 후 그 서비스집합에 근거하여 최단경로알고리즘에 따라 O-D물량의 초기 운송경로를 결정했다고 가정하자. O-D의 운송경로집합이 정해져 있는 상태에서 네트워크의 총비용을 가장 크게 줄이는 서비스를 선정하여

개선(하위절차 1)할 수 있다. 이어 개선된 서비스 집합의 조건에서 다시 최단경로알고리즘을 사용하여 O-D물량의 운송경로를 결정(하위절차 2)할 수 있다. 하위절차 1과 하위절차 2의 교대 적용은 해가 개선될 가능성이 있는 한 계속된다. 이러한 해 개선개념은 Crainic (1984, 1986)이 철도화물네트워크에 대해 비선형 서비스네트워크디자인문제를 풀기 위해 제시한 것이다. 본 연구에서는 이 개선방법의 기본개념을 원용한다.1)

1. 서비스빈도 개선알고리즘

1) 초기빈도설정

서비스빈도개선절차는 초기빈도집합을 미리 설정하면서 시작된다. 제시된 문제에서 초기서비스빈도집합은 식(10)과 같이 설정된다.

$$\hat{f}_\mu = \frac{\sum_i \sum_j o_{ij} - \sum_j o_{j\mu}}{\alpha_\mu} \quad \forall l' \in L \quad \forall i \in I \quad (10)$$

여기서,

- i, j : 서비스네트워크의 노드인덱스($i \in I, j \in J$)
- j^i : 출발지노드가 i 인 서비스링크의 인덱스 ($l' \in L$)
- \hat{f}_μ : 서비스링크 l' 의 초기빈도
- o_{ij} : i 와 j 간의 O-D물량
- α_μ : 서비스링크 l' 의 열차서비스용량

식(10)은 각 서비스링크의 초기빈도가 네트워크내의 총O-D물량에서 해당서비스링크를 이용할 가능성이 없는 O-D물량, 즉 해당서비스링크의 출발지를 목적지로 하는 O-D물량을 제외한 물량을 수용할 수 있는 빈도 수준에서 설정된다는 것을 의미한다. 달리 말하면 네트워크 내 총 O-D물량을 처리할 수 있는 최대빈도를 표현한다. 초기빈도로 이와 같이 높은 빈도로 설정하는 이유는 각 서비스링크의 상대적 잠재성을 알기가 매우 어렵다는 점 외에 각 서비스링크의 잠재성을 동일하다고 보고 동등한 기회를 부여하고자 함이다.

1) 그러나 Crainic방법과 본 연구에서 제시하는 방법은 다음과 같이 크게 두 가지 차이가 존재한다. 먼저 초기서비스집합(구간 및 빈도)의 설정과 관련하여, Crainic은 모델자가 임의로 잠재적 서비스를 설정하도록 하는 반면 본 연구는 Hub-and-spoke라는 네트워크 특성을 감안하여 모든 노드(터미널)간을 연결하는 O-D쌍을 초기서비스로 설정한다. 빈도 또한 Crainic은 막연히 높은 빈도수준을 설정하는 반면 본 연구는 각 서비스가 총O-D물량을 수용할 수 있는 수준의 빈도를 초기수준으로 설정한다. 다음으로 개선할 서비스빈도의 수정과 관련하여 Crainic은 매 빈도수정 실행단계마다 1회의 빈도를 수정하는 반면 우리방법은 여러 빈도의 수정이 가능하다.

2) 서비스빈도개선알고리즘

서비스빈도개선 알고리즘의 개념을 설명하면, 각 서비스개선단계에서 서비스빈도를 개선함으로써 네트워크의 총비용을 가장 크게 감소시키는 서비스를 수정대상 서비스로 선정된다. 이 방법의 기본개념은 Crainic (1986)에 의해 제안되었다.

물량의 운송경로가 주어진 상태에서 특정서비스의 빈도가 감소($\psi_e(\Delta^+) > 0$) 또는 증가($\psi_g(\Delta^-) > 0$)할 경우 네트워크의 총편익은 식(11), 식(12)와 같이 표현된다.

$$\psi_e(\Delta^+) = Z(\bar{X}, f_1, \dots, f_e, \dots, f_v) - Z(\bar{X}, f_1, \dots, f_e - \Delta^+, \dots, f_v), \quad \forall e \in L \quad (11)$$

$$\psi_g(\Delta^-) = Z(\bar{X}, f_1, \dots, f_g, \dots, f_v) - Z(\bar{X}, f_1, \dots, f_g - \Delta^-, \dots, f_v), \quad \forall g \in L \quad (12)$$

여기서,

$Z(\bar{X}, f_1, \dots, f_e, \dots, f_v)$: 주어진 물량의 운송경로(X) 하에서 총비용함수

f_e : 열차서비스 $e(e \in L)$ 의 빈도

L : 열차서비스 집합

Δ^+ 또는 Δ^- : 서비스빈도의 감소(또는 증가)분을 나타내는 양(또는 음)의 정수

$\psi_e(\Delta^+)$, $\psi_g(\Delta^-)$ 을 이용한 서비스빈도의 전체적인 개선절차는 초기빈도 설정, 최대 비용개선가능 서비스 선정, 빈도수정 등의 단계로 이루어진다.

- (1) 모든 서비스에 대해 초기빈도를 설정한다
- (2) $\psi_e(\Delta^+)$ 과 $\psi_g(\Delta^-)$ 을 계산한다
- (3) 다음과 같이 π 을 찾는다

$$\pi = \max\{\pi_e, \pi_g\}$$

여기서, $\pi_e = \{\max \psi_e(\Delta^+)\}$, $\pi_g = \{\max \psi_g(\Delta^-)\}$

- (4) $\pi \leq \epsilon$ (ϵ 은 매우 작은 양수값)이면, 중지한다

- (5) 그렇지 않으면, 다음과 같이 빈도를 수정한다.

$$f_l = \begin{cases} f_l - \Delta^+, & \text{if } \pi = \pi_e \text{ and } l = e \\ f_l - \Delta^-, & \text{if } \pi = \pi_g \text{ and } l = g \\ f_l, & \text{otherwise} \end{cases}$$

(1)~(5)까지의 서비스개선절차는 개선된 해를 찾는 과정에서 매우 중요하다. 열차서비스를 개선하는 매 순간(하위절차 1)마다 하위절차 2인 최단경로문제가 해결되어야하기 때문이다. 달리 말하면 열차서비스 개선의 효율성 정도에 따라 해의 계산소요시간의 크기가 좌우된다는 것이다. 이런 의미에서 전체 해 도출과정에서 효율적인 서비스개선절차의 개발은 매우 중요하다. 본 연구에서는 서비스개선방법에 따라 3가지 알고리즘을 제시한다.

(1) 철저열거(exhaustive enumeration)기반 알고리즘(알고리즘 I)²⁾

이 방법은 Crainic에 의해 제안된 알고리즘으로서 각 개선단계마다 1회의 빈도가 개선된다. 그러므로 철저열거기반 알고리즘은 계산의 정확도는 높지만 막대한 계산소요시간의 발생이 예상된다. 더욱이 우리문제에서는 초기서비스 빈도의 설정을 위해 매우 높은 수준의 빈도를 설정해야 하기 때문에 대규모 운송망—특히 다수의 기점과 다수의 종점을 가진 Hub-and-spoke 운송망—에 대해 이 방법은 그다지 현실적이지 못하다.

(2) 최적빈도기반 알고리즘(알고리즘 II)

알고리즘 II는 모든 물량의 운송경로가 사전에 결정되어 있다면 그 상황에서 각 열차서비스별로 최적서비스빈도를 구할 수 있다는 데 착안한다. 그런데 모든 열차서비스에 대해 높은 수준의 초기빈도가 설정되고 물량의 초기최적경로가 결정되기 때문에, 이후는 문제해결절차의 각 단계에서 항상 전(前) 단계에서 결정된 물량수송경로를 이용할 수 있다. 서비스 개선과정에서 최적서비스빈도의 계산이 중요한 이유는, 최적서비스빈도를 알 수만 있다면 각 단계에서의 최적서비스빈도와 그 시점에서 적용되고 있는 서비스빈도간과의 차이만큼 서비스빈도를 개선할 수 있다는 데 있다. 이는 각 서비스 개선단계에서 복수의 서비스빈도를 수정할 수 있다는

2) 알고리즘의 명칭은 각 빈도개선 실행단계마다 최소빈도개선단위인 1회씩 빈도가 개선된다는 점이 고려되었다.

것을 의미하기 때문에 전체 해 도출과정에서 최단경로 문제의 수행횟수를 크게 감소시킬 수 있다. 최적서비스 빈도는 다음의 절차를 통해 얻어진다.

서비스링크 1의 이용물량이 주어지고 빈도 f_i 3)을 양의 실수로 가정한다면, 각 서비스링크 위에서 발생하는 총비용 Y_i 은 식(13)과 같이 f_i 에 관한 2차 함수로 나타낼 수 있다.

$$Y_i = \left\{ \frac{cvt \cdot pl \cdot \bar{f}a_i}{2f_i} \right\} + ca \cdot ds_i \cdot f_i + \{ ct \cdot ds_i + cvt \cdot th + co + \frac{cvt \cdot ds_i}{v} \} \bar{f}a_i \quad (13)$$

여기서,

$\bar{f}a_i$: 서비스링크 1에 주어진 이용물량

결과적으로 최적빈도는 식(14)와 같이 계산된다.

$$f_i^* = \sqrt{\frac{cvt \cdot pl \cdot \bar{f}a_i}{2 \cdot ca \cdot ds_i}} \quad (14)$$

(3) 교대알고리즘(알고리즘 III)

최적빈도기반 알고리즘은 각 서비스 개선단계마다 복수의 서비스빈도를 개선할 수 있어서 계산속도는 향상시킬 수 있으나 철저열거기반 알고리즘보다 상대적으로 해의 정확도가 떨어질 가능성이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 적당한 계산소요시간에 받아들일 만한 정확도를 가져올 수 있는 또 다른 알고리즘을 개발하였다. 철저열거기반 알고리즘과 알고리즘 II를 교대로 수행하는 알고리즘 III이 그것이다.

교대방법의 개발에서 문제의 특성을 고려하는 것이 필요하다. 제시된 문제의 해 도출과정은 두 가지 특징을 가지고 있다. 먼저 해 도출과정의 마지막 단계에 도달하면 할수록 서비스용량제약을 만족하지 않는 서비스링크 수의 증가로 인해 각 단계별 계산시간은 점점 증가한다. 더욱이 네트워크의 규모가 커지면 커질수록 계산소요시간은 급증한다. 이 두 점을 고려해서 본 연구에서는 철저열거기반 알고리즘을 적용할 서비스개선 실행

단계 수를 식(15)와 같이 계산한다.

$$i_{exh} = n_{int} \quad n_{exh} \text{가 정수인 경우} \\ n_{int} + 1 \quad n_{exh} \text{가 정수가 아닌 경우} \quad (15)$$

여기서,

i_{exh} : 알고리즘 I에 의한 서비스개선 실행 (iteration)수

$$n_{exh} = \beta(n_f \cdot r_s \cdot r_b)$$

n_f : 직전의 개선실행단계에서 알고리즘 II에 의해 개선된 서비스빈도수

r_s : 기준네트워크의 총서비스링크수를 해결할 네트워크의 총서비스링크수로 나눈 비율

r_b : 직전의 개선실행단계에서 알고리즘 II에 의해 개선되었을 때의 π 값을 초기 π 값으로 나눈 비율

β : 모델자에 의해 주어지는 조정값

n_{int} : n_{exh} 의 정수부분의 값

식(15)에서 볼 수 있는 바와 같이 r_s 에서 기준네트워크는 해결하고자 하는 실험네트워크의 일부로 구성되는 소규모네트워크를 모델자가 사전에 임의로 선택—가령 해결한 네트워크가 유립운송망이면 기준네트워크는 독일운송망을 선택—하여 총서비스링크수를 정한다. 따라서 r_s 는 해결할 네트워크의 규모가 크면 철저열거기반 알고리즘에 의한 빈도개선 실행수를 줄이는 역할을 한다. 반면 r_b 는 해도출 후반부분에서 계산속도가 크게 떨어지면 철저열거기반 알고리즘에 의한 부분을 줄이는 역할을 한다. 해도출 마지막 단계로 갈수록 π 는 더욱 작은 값으로 될 것이기 때문이다. β 는 적절한 계산시간내에 해를 도출할 수 있도록 모델자가 임의로 부여하는 투입계수이다. 문제는 β 를 어떻게 적절하게 선택할 수 있는냐 하는 것이 관건이다. 만일 β 의 변화에 따라 도출된 해의 편차가 크지 않다면 모델자가

3) 동일서비스링크에 복수형태의 열차서비스가 존재하지만 본 알고리즘에서는 동일서비스링크에서 1개 형태의 열차서비스를 선택하도록 규정한 다. \bar{a}_i 는 선택된 열차서비스를 의미한다.

적당히 임의로 줄 수 있게 된다. β 의 변화에 따른 해의 민감도분석과 평가는 IV. 2에서 논의된다.

2. 운송경로 결정알고리즘

서비스집합이 사전에 결정되어 있다면 원문제는 식 (16)~(19)로 구성되는 하위문제로 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimise } Z(X,T) = \sum_{m \in M} \sum_{k \in K(m)} cf_k^m X_k^m + \left(\sum_{l \in L} \sum_{p \in P} \sum_{f \in F(p,l)} cs_l^{pf} \overline{T}_l^{pf} \right) \quad (16)$$

$$\sum_{k \in K(m)} X_k^m = 1 \quad \forall m \in M \quad (17)$$

$$\sum_{m \in M} o^m \sum_{k \in K(m,l)} X_k^m \leq \sum_{p \in P} \sum_{f \in F(p,l)} \alpha_l^{pf} \overline{T}_l^{pf} \quad \forall l \in L \quad (18)$$

$$X_k^m \in \{0,1\} \quad \forall k \in K(m) \quad \forall m \in M \quad (19)$$

식(16)~(19)로 구성되는 하위문제는 물량의 운송 경로를 결정하는 문제로 원문제에서 제약식(7)과 (9)가 제외된 것이다. 목적함수에서 서비스관련비용은 고정된다. 제약식(18)의 우변과 같이 서비스용량도 고정된다. 결과적으로 우리의 운송경로결정문제는 서비스용량제약을 가진 최단경로(최단비용기준)문제가 된다.

물량의 운송경로 결정과정은 먼저 서비스용량 제약을 고려하지 않고 최단경로문제를 해결한다. 이어 용량 제약식을 만족하지 않은 경우 운송경로를 조정한다.

1)서비스 용량제약 미고려시의 운송경로 결정

이 경우 운송경로의 결정은 서비스감소시의 경우와 서비스 증가시의 경우로 구분되어 이루어진다. 서비스 빈도가 주어진 조건에서 직전 빈도개선단계($t-1$ 번째 개선단계) 및 현 빈도개선단계(t 번째 개선단계)시 서비스링크 l 에서 발생하는 운송경로의 단위당비용(비용/톤)을 각각 $cf_l^r(t-1)$ 과 $cf_l^r(t)$ 라 한다면, 먼저 빈도가 감소할 경우 부등식(20)이 성립한다

$$cf_l^r(t) > cf_l^r(t-1) \quad (20)$$

이는 빈도 감소로 서비스링크에서 발생하는 지체비

용이 증가되기 때문이다. 따라서 서비스링크 l 을 이용하던 O-D물량은 다른 대안서비스로 전환될 가능성이 있는 반면, 이용하지 않던 O-D물량은 자신의 운송경로를 변경하지 않게 된다. 이 경우 빈도가 감소되는 서비스링크 l 을 이용하는 물량에 한해서만 최단운송경로를 찾으면 되므로 계산시간을 절약할 수 있게 된다.

반면 서비스빈도가 증가한다면 역으로 부등식(21)이 성립된다.

$$cf_l^r(t) < cf_l^r(t-1) \quad (21)$$

부등식(21)은 서비스빈도 증가의 경우 해당서비스를 이용하는 O-D물량의 단위당운송경로비용이 감소함을 나타낸다. 이는 앞서의 서비스빈도 증가 경우와 반대로 해당서비스를 이용하던 O-D물량은 기존운송경로를 유지하는 반면, 해당서비스를 이용하지 않던 O-D물량은 기존운송경로를 변경할 가능성이 존재한다. 이 경우 운송경로를 변경하는 O-D물량을 정확하게 예측하는 것은 매우 어렵기 때문에 해당서비스를 이용하는 O-D물량을 제외한 다른 모든 O-D물량의 운송경로를 다시 결정한다. 그러나 t 번째 개선단계에서 빈도증가가 발생되기 위해서는 우선 이용물량이 $t-1$ 번째 개선단계에서 보다 커야 한다. 동시에 $t-1$ 번째 개선단계에서의 최적빈도가 $t-1$ 번째 개선단계에서의 이용물량처리가능 최소빈도와 t 번째 개선단계에서의 이용물량처리가능 최소빈도 보다 커야 하고, 아울러 t 번째 개선단계에서의 최적빈도도 이용물량처리가능 최소빈도 보다 커야 등 매우 엄격한 조건이 요구된다. 따라서 전체 해 도출과정에서 서비스증가의 경우는 매우 적을 것으로 예상된다.⁴⁾

2)서비스용량제약을 고려한 운송경로 조정

서비스빈도가 수정되면 서비스수준과 비용의 변화로 O-D물량의 운송경로가 다른 운송경로로 전환하게 된다. 이 경우 물량이 서비스처리용량을 초과하는 경우가 발생할 수 있다. 만약 이용물량이 서비스용량을 초과할 경우 우리는 해당서비스링크에 페널티(θ)를 부과하여 용량제약조건을 만족시킨다. 페널티의 부과는 용량초과 서비스링크가 존재하지 않을 때까지 계속된다. θ 는 식 (22)와 같이 계산된다.

4) 전체 서비스빈도 개선과정에서 서비스빈도 증가실행수의 최소화는 IV.2에서 확인된다.

$$\theta = \begin{cases} \frac{cvt \cdot pl}{2f_i(f_i - 1)}, & \text{if } f_i > 1 \\ \frac{cvt \cdot pl}{2}, & \text{if } f_i = 1 \end{cases} \quad (22)$$

식(22)에서 $\theta(f_i > 1)$ 는 서비스빈도의 단위변동분(즉, 1회)에 따른 이용물량의 단위당 수송루트비용의 변동분을 의미한다. θ 는 서비스빈도의 수준이 높으면 높을수록 점점 더 작은 값(0에 수렴)을 가진다. 서비스빈도의 수준이 높음에도 서비스용량초과가 발생한다면, 그 서비스링크는 높은 이용잠재력을 가졌음을 의미하고 아울러 비용변화에 대한 수송루트의 탄력성이 높음을 의미한다. 그러므로 이 경우 θ 에 낮은 값을 부과하는 것은 매우 합리적인 것으로 판단된다. 반면 서비스빈도의 수준이 낮다면 그 서비스는 낮은 이용잠재력과 이용물량의 낮은 비용탄력성을 가진다. 예를 들어 주 1회의 서비스를 제공하는 서비스링크의 경우 이용물량이 존재한다면 그 물량은 비용변화에 둔감할 것이기 때문이다. 그러므로 낮은 빈도의 서비스링크 경우 우리는 비교적 높은 페널티값을 부과한다. 결국 전체 해도출과정에서 θ 는 0과 $(cvt \cdot pl)/2$ 사이의 탄력적인 값을 가진다.

IV. 적용 및 평가

1. 테스트문제의 설정

세 알고리즘의 효율성을 비교평가하기 위해 본 연구는 유럽의 실제운송망에 기초하여 규모에 따라 4개의 실험문제를 설정하였다. 문제1은 프랑스 및 이탈리아 일부지역, 문제2는 독일, 문제3은 독일 및 인근지역, 그리고 문제4는 유럽전체지역을 나타내는 운송망이다. <그림 3>은 문제4를 구성하는 유럽의 철도운송망을 나타낸 것이다.

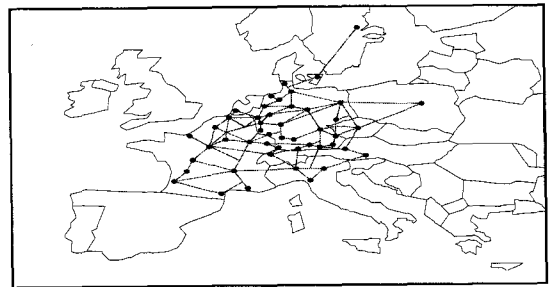
모든 알고리즘은 Borland사의 C++Builder를 이용해 프로그래밍되었으며, 테스트는 64M Ram을 가진 Pentium III 565 Mhz급 PC에서 이루어졌다.

2. 알고리즘의 평가

알고리즘의 평가는 운송망에 용량기준으로 두 형태의 열차, 즉 600톤 용량 열차서비스(completed train service)와 300톤 용량 열차서비스(semi train

<표 1> 테스트문제

	노드 수	초기서비스 수	O-D물량(톤/주)
문제1	15	210	47,808
문제2	24	552	210,264
문제3	33	1,056	255,554
문제4	48	2,256	396,002



<그림 3> 테스트문제(문제4)의 운송망

service)가 제공된다고 상정한다. 복수형태의 서비스를 가정하는 이유는 Hub-and-spoke운송망은 수송규모의 경제를 활용하는 운송망이므로 열차용량은 매우 중요한 요소이기 때문이다.

실험결과, 예상대로 철저열거기반 알고리즘(알고리즘 I)은 높은 정확도의 해를 도출했으나 매우 많은 계산시간이 요구된다. 특히 가장 큰 규모의 문제(문제4)의 경우 24시간 내 해를 도출하는 데 실패하였다. 알고리즘 II는 계산효율은 매우 높은 반면 철저열거기반 알고리즘에 비교하여 2%미만의 차이를 보였다. 알고리즘 II의 해의 정확도를 개선하기 위한 알고리즘 III은 적당한 계산시간(가장 큰 규모의 테스트네트워크 경우 3시간 미만 소요)에 해의 정확도도 매우 높음(철저열거기반 알고리즘에 의한 해에 비해 1%미만의 차이)을 확인시켜 주었다.

해도출과정에서 서비스빈도개선을 위한 전체 실행수 중 서비스감소의 경우가 절대적 비중을 차지하였으며, 앞서 예상한 대로 서비스증가의 경우는 매우 낮음(전체 실행수의 0.5%)을 확인할 수 있었다.

<표 3>과 <그림 4>는 모델자가 임의로 주는 파라미터 β 에 따른 해의 변화를 나타낸 것이다. 테스트는 문제2와 문제3을 대상으로 했다. β 의 크기에 따른 전체적인 해는 개선경향을 보이고 있으나 큰 개선효과는 없다. 해의 차도 가장 낮은 초기값($\beta=0.1$)을 제외하고 0.3%-1.2%내로 비교적 안정적이다. 반대로 β 의 크기에 따라 계산시간은 큰 차(최소값에 비해 16배)를 보이고 있다. 결과적으로 모델자는 초기최저값을 제외

〈표 2〉 알고리즘별 적용결과

	해 차이*			계산시간(초)		
	알고리즘 I	알고리즘 II	알고리즘 III**	알고리즘 I	알고리즘 II	알고리즘 III
문제 1	0.0000	-0.0092	0.0014	38	1	24
문제 2	0.0000	0.0197	0.0057	1460	12	517
문제 3	0.0000	0.0177	-0.0064	8365	102	1658
문제 4	***	-	-	***	660	8958

* : 알고리즘 II 또는 III에 의한 해 / 알고리즘 I에 의한 해 - 1

** : $\beta = 1.5$ 적용

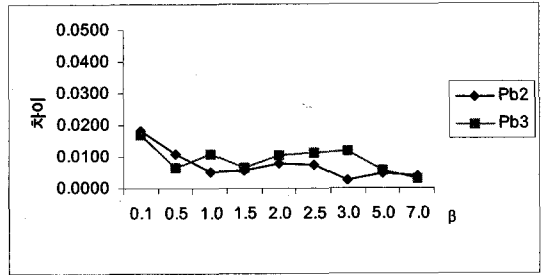
*** : 24시간 내에 해를 얻지 못한 경우

〈표 3〉 β 의 변화에 따른 알고리즘 III의 성과치 변화

β	문제2		문제3	
	차	계산시간(초)	차	계산시간(초)
0.1	0.0182	65	0.0168	261
0.5	0.0108	215	0.0067	666
1.0	0.0052	357	0.0107	1140
1.5	0.0057	517	0.0064	1658
2.0	0.0077	643	0.0105	1853
2.5	0.0074	742	0.0111	2276
3.0	0.0025	786	0.0116	2832
5.0	0.0047	908	0.0057	3915
7.0	0.0038	987	0.0029	4227

하고 적절한 계산시간을 고려하여 임의로 β 값을 주더라도 철저열거기반 알고리즘과 비교해 큰 차이 없이 해를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 알고리즘 III을 이용하여 실제유럽의 철도화물운송망을 반영하는 문제4에 대해 물량의 할당된 구조를 파악하였다. 모든 노드(터미널)의 화물처리 능력 및 서비스수준을 동일한 것으로 설정하였음에도 48개 터미널중 8개 터미널로 물량이 집중되는 결과를 얻었다. 즉, 전체 통과물동량과 대비하여 이들 8개 터미널이 처리하는 통과물동량은 66%에 달했다. 터미널의 처리능력이 모두 동일하다고 가정하였음에도 높은 물동량집중도를 보인다는 것은 실제 허브터미널의 입지가 정해졌을 경우 허브터미널로의 물량집중도는 더욱 높아질 것임을 의미한다. 허브터미널은 일반 터미널에 비해 더 높은 화물처리능력을 가지기 때문이다. 운송경로에 있어서도 O-D물량 중 중간에 연계터미널을 거치는 경우가 55% -달리 말하면 직송물량은 45% -였으며, 연계O-D물량 중 2개 이하의 연계터미널을 이용하는 물량이 94%로 전형적인 혼합전략에 기반한 Hub-and-spoke운송망의 형태를 보여주었다. 결국 유럽에서 철도화물, 특히 컨테이너수송을 위한 복합운송



〈그림 4〉 β 의 변화에 따른 알고리즘III의 성과치 변화

화물에 대해 Hub-and-spoke운송전략의 적용가능성은 높은 것으로 평가된다.

V. 결론

본 연구는 철도화물운송에 있어서 최근 적용이 확대되고 있는 Hub-and-spoke운송전략을 모형화하고 대규모운송망에도 적용이 가능한 알고리즘을 개발하였다. 모형은 Hub-and-spoke운송의 전형적인 서비스형태 - 터미널간 직송서비스 - 를 감안한 서비스네트워크디자인문제로 설정되었다. 비용은 일반화된 운영비용 외에 열차속도, 서비스빈도, 터미널에서의 환적처리속도에 따른 지체비용도 고려되었다. 그에 따른 목적함수의 비선형성은 빈도별 서비스결정변수의 설정을 통해 전체 문제를 2진 정수선형문제(linear binary integer problem)로 표현하였다. 해도출의 어려움으로 전체문제를 두 하위절차 - 서비스빈도개선절차 및 운송경로 결정절차 - 로 분할하여 각각을 휴리스틱절차를 통해 해결하고자 하였다. 서비스빈도개선방법에 따라 3가지 알고리즘 - 철저열거기반 알고리즘, 최적빈도기반 알고리즘, 교대 알고리즘 - 이 제시되었다. 유럽의 실제 철도화물운송망을 반영하는 실험문제(48개 노드, 2,256개 서비스링크)에 적용한 결과 Crainic(1986)방법에 기반한 철저열거기반 알고리즘은 매 서비스빈도개선시 최소규모의 빈도(1회)가 개선되는 관계로 24시간 이내 해도출이 불가능하였다. 반면 본 연구에서 제시한 2 알고리즘 중, 특히 교대알고리즘은 적당한 계산시간(3시간) 내에 해의 정확도도 높은(철저열거기반 알고리즘과 비교하여 1%미만의 차이) 결과를 얻었다. 특히 교대알고리즘은 모델자가 임의로 줄 수 있는 파라미터를 통해 계산시간의 조정이 가능하여 보다 큰 규모의 운송망에도 적용이 가능한 장점을 지니고 있어 다양한 규모의 실제문제에 탄력적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된

다. 이 외 본 연구에서 제시한 모형은 일반적인 서비스 네트워크디자인모형에 기반하고 있으나 잠재적 허브입지를 제안할 수 있다. 실험예제에 적용한 결과 환적물동량이 8개 터미널에 전체의 66%가 집중되는 등 잠재적 입지를 파악할 수 있어 이 점을 확인할 수 있었으며, 또한 직송서비스, 허브연계서비스(1-stop, 2-stop 등) 등 운송서비스구조를 다양하게 파악할 수 있었다.

이러한 기여에도 불구하고 본 연구는 향후 몇 가지 추가적 연구가 필요하다. 먼저 본 연구에서 개발한 모형이 전략적인 의사결정수준의 모형인 관계로 보다 단기의 실제운송계획에 활용되기 위해서는 철도선로의 용량, 터미널의 용량 등 인프라와 관련된 제약조건을 감안하는 것이 필요하다. 또한 허브서비스는 직송에 비해 우회할 경우 서비스 질의 저하가 야기 때문에 화주의 운송완료 요구시간 등의 서비스수준과 관련된 제약조건이 고려될 수 있다면 현실을 더욱 잘 반영하는 모형이 될 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Assad, A.A. (1980), "Modelling of rail networks: toward a routing/makeup model", *Transportation Research-B*, vol.14B, pp.101~114.
2. Bodin, L.D., Golden, B.L. and Schuster, A.D., et al. (1980), "A model for the blocking of trains", *Transportation Research-B*, vol.14B, pp.115~120.
3. Cranic, T.G., Ferland, J.A. and Rousseau, J.M. (1984), "A tactical planning model for rail freight transportation", *Transportation Science*, vol.18, No.2, pp.165~184.
4. Cranic, T.G. and Rousseau, J.M. (1986), "Multicommodity, multimode freight transportation: a general modeling and algorithmic framework for the service network design problem", *Transportation Research-B*, vol.20B, No.3, pp.225-242.
5. Haghani, A.E. (1989), "Formulation and solution of a combined train routing and makeup, and empty car distribution model", *Transportation Research-B*, vol.23B, No.6, pp.433~452.
6. INRETS(Coordinator, 2000), "Intermodal Quality: SIMIQ". Project funded by the European Commission, deliverable 6, 67p.
7. Keaton, M.H. (1989), "Designing optimal railroad operating plans: Lagrangian relaxation and heuristic approaches", *Transportation Research-B*, vol.23B, No.6, pp.415~431.
8. Keaton, M.H. (1992), "Designing railroad operating plans: a dual adjustment method for implementing Lagrangian relaxation", *Transportation Science*, vol.26, No.4, pp.263~279.
9. Magnanti, T.L. and Wong, R.T. (1984), "Network design and transportation planning: model and algorithms", *Transportation Science*, vol.18,, pp.1-55.
10. Marín, A. and Salmerón, J. (1996a), "Tactical design of rail freight networks. Part I: Exact and heuristic methods", *European Journal of Operational Research*, vol.90, pp.26~44.
11. Marín, A. and Salmerón, J. (1996b), "Tactical design of rail freight networks. Part II: Local search methods with statistical analysis", *European Journal of Operational Research*, vol.94, pp.43~53.
12. Niérat, P. (1998), "Anatomie d'un réseau intermodal Hub-and-spoke", *Rapport INRETS N°220, Arcueil*, p.75
13. Touati, N. (1996), "Modèles et algorithmes pour l'optimisation de l'offre de transport combiné dans un réseau de services avec demande élastique", *Thèse à l'Ecole Central de Paris*.

✉ 주 작 성 자 : 정승주

✉ 논문투고일 : 2004. 3. 13

논문심사일 : 2004. 5. 13 (1차)

2004. 5. 31 (2차)

심사판정일 : 2004. 5. 31

✉ 반론접수기한 : 2004. 10. 31