

철도네트워크 구축을 위한 Railway NDP모형



| 임 용 택 |
전남대학교
교수

I. 서론

저탄소 녹색성장으로 상징되는 새로운 산업사회가 도래함에 따라 최근 철도에 대한 관심이 높아지고 있으며, 장래 효율적인 철도망을 구축하기 위하여 교통수단간 역할정립, 철도시설의 현대화 및 운영효율성제고, 국가 철도망 구축 기본방향 및 정책방향 정립, 국가철도망의 투자우선순위 설정 등 다양한 연구들이 진행 중에 있다. 그러나, 현재 까지 계획되어온 우리나라 철도망계획은 구체적인 네트워크 차원의 검토 보다는 주요 도시간 또는 주요 화물발생지간을 연결하는 축 개념으로 계획되어 온 경향이 있었다. 이는 기존 철도계획시 네트워크 효과를 분석하는 기법이 제대로 정립되지 못해, 주로 정책적인 측면에서 철도망을 계획한 측면에 기인한다. 이에 반해 고속도로의 경우, 오랜 기간의 연구를 통하여 도로 간의 연결성, 네트워크 효과 등을 고려하는 네트워크 차원의 분석 기법들을 실제 적용하여 왔으며, 특정 고속도로의 건설이 네트워크측면에서 어떤 효과를 가질지를 미리 예상하고 사업을 계획하고 있다.

이런 측면에서 본 연구는 철도건설로 인한 네트워크 효과를 고려할 수 있는 철도망 설계문제(Railway Network Design Problem, RNDP)에 대하여 기술하고자 한다. 철도망 설계문제는 도로망 설계문제(network design problem)를 확대한 개념으로 기본적인 원리는 동일하나, 철도가 갖는 특징을 포함하게 된다. 일반적으로 이런 교통망설계문제는 상위와 하위문제로 구성된 bi-level 프로그램

으로 모형을 구축하며, 상위문제는 총 통행비용을 최소화시키는 설계변수(design variable)를 구하는 문제이고, 하위문제(lower level problem)는 이에 따른 철도 승객의 행태변화 문제로 표현된다. 따라서, 본 연구에서 설명하는 철도망 설계문제는 철도건설로 인한 승객들의 통행행태변화를 고려할 수 있는 장점이 있으며 이점이 기존 철도망설계문제와의 차이점이다.

II. 기존 철도망모형 고찰

1. 철도수요모형

해외에서도 철도망에 대한 체계적인 연구는 오래되지 않으며, 철도가 갖는 에너지 효율성과 환경오염의 저감이라는 장점으로 최근 새롭게 각광받고 있다. 외국 역시 철도 수요예측은 국내와 비슷하게 Emme/2나 TransCAD와 같은 상용화된 프로그램에 포함된 대중교통모형을 사용하고 있다. 이들 프로그램들은 최적전략(optimal strategy)을 기반으로 여러 형태의 대중교통 통행배정 기법을 제공하고 있다. 영국의 경우 <그림1>과 같이 국가 철도망계획모형(National Rail Model)을 구축하여 네트워크 효과를 분석하고 있으며, 국가철도망 모형은, 크게 철도수요모형(Rail demand model), 네트워크 모형(Rail network model), 그리고 요금모형(Fare model)으로 구성된다. 이모형은 국가교통 모형의 일부로 구축되고 공로모형(road network model)

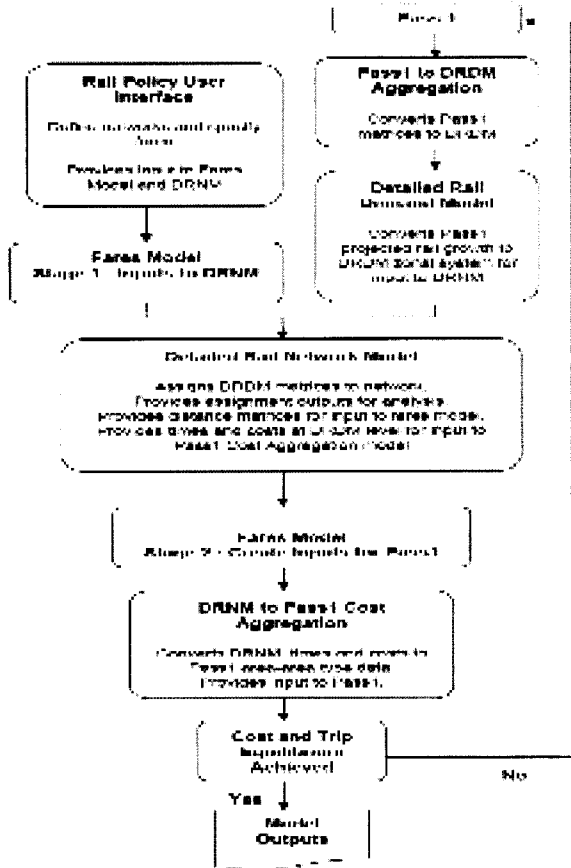


그림 1. 국가 철도망모형(영국)

과 서로 환류(feedback)과정을 거치도록 되어 있다. 특히, 요금수준은 정책적인 요소로서 이에 따른 영향이 철도뿐만 아니라 공로에도 미치기 때문에 이를 동시에 고려하는 다 교통수단모형으로 구축되어 있다.

2. 철도망 설계문제

철도망설계문제(RNDP)는 교통 운영자의 입장에서 총 사회적 비용을 최소화시키기 위하여 통제 가능한 수단을 통해서 통행자의 이동을 규제하는 것으로, 설계변수(통제 변수)가 연속형일 경우 연속형 철도망 설계문제(Continuous RNDP)로 이산형일 경우 이산형 철도망설계문제(Discrete RNDP)로 분류된다. 철도망설계문제는 일반적으로 bi-level 문제로 구성되며, 상위문제는 특정 목적을 달성하기 위한 최적 통제변수를 구하는 문제이며, 하위문제(lower level problem)는 이에 따른 사용자의 선택 문제가

된다.

1) 철도망설계문제(RNDP)의 분류

Guihaire et al.(2008)은 <그림 2>처럼 철도교통망모형을 크게 철도설계(transit network design problem, TNDP), 철도 운행횟수결정(transit network frequencies setting problem, TNFSP), 그리고 철도 운영 시간표 설정(transit network time tabling problem, TNTP) 등으로 구분되며, 이외에 차량과 운전자 스케줄링도 포함된다. 이중 철도 설계와 철도 운행횟수를 동시에 고려하는 철도설계 및 운행 스케줄 문제(transit network design and scheduling problem, TNDSP), 그리고 차량 운행횟수와 시각표를 함께 고려하는 철도 스케줄 문제(Transit Network Scheduling Problem, TNSP) 등이 있다.

2) 철도망 설계모형

철도망 설계모형(RNDP)은 철도망의 효율성을 높이기 위하여 철로를 신설 또는 확장 시 목표로 설정한 지표를 최적화시키는 최적 노선구간을 선정하는 문제이다. 철도망 설계문제는 일반적으로 bi-level program으로 표현되는 도로망설계문제를 적용할 수 있으나 철도망이 갖는 속성들(철도 수요, 철도용량, 배차간격, 환승 등)을 고려해서 모형이 구성되어야 하며 일반적인 bi-level program은 다음과 같다.

[상위문제 (upper level problem)]

$$\max_{y \in Y} F(y, v(y))$$

$$s.t. G(y, v(y)) \leq 0$$

상위문제의는 다음 하위문제를 만족시켜야 한다.

[하위문제 (lower level problem)]

$$\min_{v \in V} f(y, v)$$

$$s.t. g(y, v) \leq 0$$

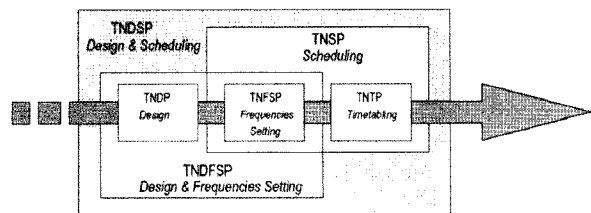


그림 2. 대중교통망설계의 분류(Guihaire et al., 2008)

여기서는 의사 결정자의 제약집합을 나타내는데, 주로 공사비의 제약 등이 여기에 속하며 제약식을 위와 같이 명시적으로 표현하지 않고, 목적함수 안에 포함시켜서 사용하는 경우도 있다. 하위문제의 목적함수는 교통망 설계모형에서 설계변수 가 무엇이나에 따라 다르게 정의되어지며, 제약집합은 균형통행배정모형의 통행량보존과 비음 제약조건들이 여기에 속한다.

3. 기존 철도망계획의 문제점

우리나라 철도망계획의 기본인 21세기국가철도망 구축 기본계획 수립연구(2004)를 살펴보면, 수립된 국가철도망목표를 노선계획으로 구체화시키기 위하여 철도건설로 얻어지는 편익과 건설·운영비의 차이인 순현재가치(net present value, NPV)를 최대화시키는 철도망 노선을 선정하고 있다. 이는 다수의 대안 중에서 예산제약하의 순편익을 최대화시키는 철도노선선정하는 문제로 대표적인 교통망설계(network design problem, NDP)에 해당되며 다음과 같은 수리적 문제를 도입하였다.

$$\begin{aligned} \max Z &= \sum_{i=1}^n (NPV)_i X_i \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^n P_i X_i &\leq B \\ X_i &\in \{0,1\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $(NPV)_i$: 사업 i 의 순 현재가치
 P_i : 사업의 i 자본지출
 B : 예산제약
 n : 사업의 개수
 X_i : 사업 i 에 대한 결정변수(binary variable)

위의 철도망 설계문제를 풀기 위하여 세계은행(World Bank)에서 배포하는 EBM이라는 컴퓨터 프로그램을 사용하였으나 21세기 국가철도망 구축계획에 사용된 이 방법은 다음과 같은 한계를 갖고 있다.

첫째, 가장 큰 문제로, 최적 철도구간이 선정되어 건설 후 개통될 경우, 기존 철도승객들뿐 만 아니라 타 수단 승객들이 해당구간철도를 이용하는 등 승객들의 통행 행태가 변하게 되는데, 이를 반영하지 못하고 있다. 즉, 구축된

모형 내에 통행승객들의 철도선택 변화를 반영하지 못하기 때문에 현실적인 해를 도출하지 못하는 한계가 있다. 둘째, 철도망 설계문제를 풀기 위하여 사용된 세계은행(World Bank)에서 배포한 EBM 프로그램에 대한 검증이 없었다는 점인데, 비록 신뢰성 있는 기관에서 배포한 프로그램이긴 하지만 국내실정에 적합한 계수 값들을 사용하고 있는지에 대한 검토가 없었다는 한계가 있다.

III. 철도망설계모형(RNDP) 정립

앞 절에서 기술한 바와 같이 기존 철도망 설계문제들이 철도를 이용하는 통행자의 행태변화를 제대로 고려하지 못하기 때문에 이런 문제를 해소하기 위하여 여기서는 통행자의 행태를 고려한 철도망 설계모형을 정립한다. 최적상태의 고속철도망을 구축하기 위하여 식(4)와 같이 구간 통행시간과 건설비의 합을 최소화시키는 문제를 상위문제로 구성하며, 하위 문제의 경우 철도 이용객들의 통행행태를 표현하는 문제로 구성한다.

[상위문제 (upper level program)]

$$\text{minimize } Z_U(y,v) = \alpha \sum_{s \in D} v_s \cdot c_s(v_s) \cdot y_s + \sum_{s \in D} u_s \cdot$$

$$\text{s.t. } \sum_{s \in D} u_s \cdot y_s \leq B$$

$$\sum_j y_j \leq 1 \quad j \in J_s$$

$$y_s \in \{0,1\} \quad \forall s \in D \quad (4)$$

목적함수의 v_s, c_s 는 s 구간의 통행승객수와 α 통행시간을 나타내며, u_s 는 통행시간을 비용으로 환산하는 계수이고는 철도구간 s 를 건설하는데 소요되는 건설비이다. 여기서, D 는 건설이 고려되는 철도구간 집합이다. 또한, 설계변수 y 는 0과 1의 값을 갖으며, 해당 철도구간이 포함되면 1이고 그렇지 않으면 0이다. 따라서, 위 문제는 이진 정수계획법(binary integer program)으로 풀수 있다. 여기서, 첫 번째 제약식은 건설비가 예산제약(B)하에 있어야 한다는 조건이며, 두 번째는 하나의 구간에 1개 사업만 선정되도록 하는

조건으로, J_s 는 s 구간의 대안집합을 나타낸다.

[하위문제 (lower level program)]

하위문제는 철도 이용자들의 통행행태를 표현하는 것으로 여기에는 통행자의 수단선택모형과 철도를 이용하는 이용객의 노선선택모형이 포함된다. 따라서 이들을 Sheffi(1985)가 제시한 바와 같이 수단선택/통행배정 결합모형으로 표현하거나, 이들을 별개로 구분하여 로짓모형(logit model)과 같은 수단선택모형과 대중교통 통행배정모형을 순차적으로 고려할 수 있다. 대중교통 통행배정의 경우, 일반적으로 최적전략(optimal strategy)에 기반한 Emme/2의 대중교통 통행배정모형을 많이 사용하는데, 이 문제는 총통행시간과 대기시간의 합을 최소화시키는 통행량을 구하는 문제가 된다(Spiess, 1993).

$$\begin{aligned}
 & \text{minimize } Z_L(v) = \sum_a c_a v_a + \sum_i w_i \\
 & \text{s.t.} \\
 & \sum_{A_i^+} v_a - \sum_{A_i^-} v_a = g_{ir} \quad (5) \\
 & v_a \leq f_a w_i, \quad a \in A^+, i \in I \\
 & v_a \geq 0, \quad a \in A
 \end{aligned}$$

여기서, v_a 는 c_a 철도구간의 a 통행승객수와 통행시간을 나타내며, w_i 는 노드의 대기시간을 의미한다. 제약조건에서 A^+ 와 A^- 는 노드 i 에서 진출하는 링크와 진입하는 링크 집합을 나타내며 g_{ir} 은 노드 i 에서 노드 r 간의 통행수요이다. 또한, f_a 는 링크의 a 주기(frequency)를 나타낸다.

[풀이과정(solution algorithm)]

제시된 RNDP모형을 풀기 위해서는 먼저, 하위문제의 수단선택과 통행배정모형을 이용하여 초기 균형해를 구하고 이를 상위문제에 도입하여 전체 철도망의 비용을 최소화시키는 철도 신설구간을 구한다. 이들 상위문제와 하위문제가 안정적인 상태에 도달할 때까지 반복과정을 거쳐지며, 하위문제의 경우 로짓 수단선택모형과 EMME/2 또는 TransCAD와 같은 대중교통 통행배정모형으로 풀 수 있으며, 상위문제는 이진 정수계획법(binary integer program)으로 LINGO와 같은 선형 최적화프로그램을 사용

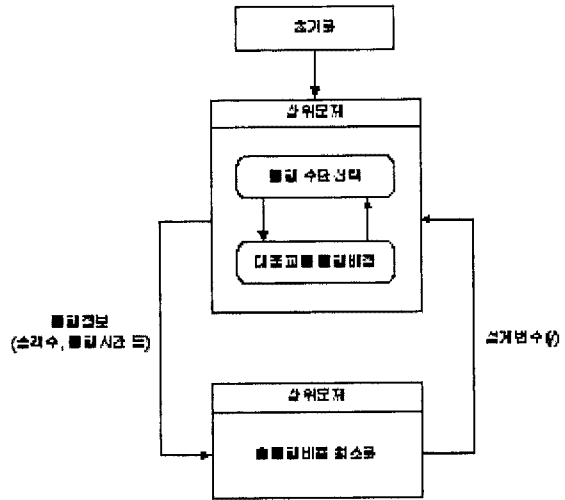


그림 3. RNDP 풀이과정

할 수 있다. <그림3>은 이런 풀이과정을 그림으로 표현한 것이다.

IV. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 기존 철도망 구축 방법이 갖고 있는 문제점 중 하나인 철도승객의 통행선택변화를 고려하지 못한다는 한계를 완화시키기 위하여 새로운 철도망 설계문제와 이를 풀기 위한 방법론을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 철도망설계문제는 철도노선의 신설로 인한 철도승객의 행태변화를 명시적으로 고려하였으며 이를 수학적으로 표현하기 위하여 bi-level 형태의 모형을 제시하였다. 이는 총 통행시간과 건설비용을 최소화시키는 상위문제와 이로 인한 이용객들의 수단전환 및 노선선택행태를 표현하는 하위문제로 구성되며, 이를 풀기 위한 개략적인 방법론도 제시하였다. 본 RNDP모형이 통행자의 행태를 고려했다는 점에서 기존 철도망 계획보다는 좀 더 현실적이라 볼 수 있으나, 이분야가 이제 기초단계에 있어 여러 가지 모형적인 한계를 갖고 있으며, 이에 대해서는 향후 추가적인 연구가 필요할 것으로 보인다.

♣ 참고 문헌

1. 박진경, 엄진기, 이준 (2008) 지속가능한 고속철도망 계획을 위한 투자우선 순위 선정에 관한 연구 : 다원-속성 효용이론을 이용하여, 한국철도학회 논문집 제11권 제1호, pp.45-53
2. 철도승객의 노선선택을 고려한 철도망 설계모형 연구 (2008), 임용택, 장준석, 박진경, 이준, 한국철도학회 논문집 제 11권 제6호, 581-587
3. 한국교통연구원 · 한국철도기술연구원 · (주)유신코퍼레이션 · 한국철도기술공사(2004), 21세기 국가철도망 구축기본계획 수립연구,
4. Emme/2 user's manual, INRO, <http://www.inro.ca/en/index.php>
5. Guihaire V., Jin-Kao Hao (2008) Transit network design and scheduling: a global review, Transportation Research (42A), 1251-1273
6. Sheffi, Y.(1985) Urban transportation Networks, Prentice-hall, Inc.
7. Spiess H.(1993) Transit equilibrium assignment based on optimal strategies: an implementation in EMME/2, <http://emme2.spiess.ch/>
8. Yang H., M.G.H. Bell(1998) Models and algorithms for road network design: a review and some new developments, Transport Review 18, 257-278
9. Travel demand modeling with TransCAD, Caliper, <http://www.maplitude.co.uk/transcad.htm>