

광역철도의 SKIP-STOP 운영에서 최적 열차패턴
및 차량소요 산정을 위한 정량분석 연구
A Study on the Quantitative Analysis to Determine
the Optimal Train Service Patterns and Train-Sets Necessary
under SKIP-STOP Operations in the Metro Railway

오석문¹⁾*, 홍순흠*, 김형진*

Seog-Moon Oh, Soon-Heum Hong, Hyung-Jin Kim

ABSTRACT

Recently, in the metro railways, researches on the skip-stop operation and development of the double deck train-set are active, which is to improve the service quality through reducing the passenger travel time and suppling seating service. Constructing new line or reforming the existent line needs huge amount of budget. Therefore, previous to start these large scale projects, scrutiny on benefit improvement, cost reduction and those optimal trade-off is indispensable.

In this paper, a quantitative analysis to determine the optimal train service patterns and train-sets necessary is proposed, under the skip-stop operation condition in the metro railways. The analysis models are formulated in mathematical programming model, and tested validity using the LINGO 7.0.

1. 서 론

수도권 주변의 위성도시(주로 신도시라고 불리는)들이 지속적으로 형성되면서, 도시권이 확대되고, 이에 따라 도심과 위성도시간의 통행 인구수가 크게 증가하고 있다. 최근 도심과 위성도시간의 통행수단으로 승용차 이용의 비중이 높게 나타나고 있다. 그러나 현재와 같이 광역 교통망에서 승용차 중심의 체계는 광역철도 중심의 체계에 비해 수송효율, 환경 등 많은 면에서 비교우위가 낮을 뿐만 아니라, 수송용량의 증대에 있어서도 한계를 지니고 있다[1,2,3,4].

이와 같은 상황에도 불구하고 해당 구간 광역철도의 수송분담률은 수요에 미치지 못하고 있는 실정이다[3,4]. 그 원인으로는 (i) 통행 목적지(O&D, Origin and Destination)간의 여행소요시간이 승용차에 비해 길고, (ii) 30~40분 이상의 장시간 여행자들을 위한 좌석제공이 미흡하며, (iii) 피크시간대에 제공되는 수송용량의 절대부족 등을 들 수 있다. 이러한 문제인식에 따라 대도시권 광역철도의 노선·시설의 확대를 위한 투자가 점차 증대되고 있으며, 승객서비스 개선 및 수송용량 증대를 목적으로 한 연구들도 활발히 수행되고 있다²⁾.

한편, 새로운 철도 노선의 건설, 차량의 개발³⁾, 기존의 선로를 개량하는 등의 사업에는 대부분

* 한국철도기술연구원

2) 이러한 정황에 대해 김경철(서울시정개발연구원)은 “경부고속철도의 건설에 뒤이은 제2의 철도 르네상스를 도시철도에서 이루어야 한다.”고 강조하고 있다.

3) 예를 들어 2층열차 등.

천문학적인 수치의 예산이 소요된다. 따라서 이러한 대규모 예산의 효율적인 사용을 위해 편익증대와 비용절감에 대한 철저한 정량분석을 통한 최적의 사업대안 도출이 요구된다. 본 논문에서는 사업대안의 여러 구성요소들 중 핵심요소라고 판단되는 (i) 열차운영패턴 선정과 (ii) 차량소요산정에 집중하였으며, 특히 열차가 SKIP-STOP 운행하는 경우에 대해 고려하였다.

SKIP-STOP의 용어에 대해 [3,5]에서는 대피선이 없는 상황에서 급행열차를 운행하는 방안이라고 정의하고 있으나, 본 연구에서는 대피선의 유무와 관계없이, 용어 자체의 의미를 생각하여 일부의 역에 대해 정차하지 않은(SKIP) 열차운행패턴이 고려되면, 이러한 열차운행패턴을 모두 SKIP-STOP이라고 한다.

Hurdle and Wirasinghe(1980)는 역의 위치 선정에 대한 기준을 제시하였다. 이들의 모형에서 철도노선은 정방향의 격자로 구성된 도로 상에 포함되어 있고, 승객이 역에 도착하기 위해서 이동하는 방향은 철도노선과 평행한 방향과 직각인 방향만이 존재한다고 가정하였다. 또 승객의 집과 가장 가까운 역과의 거리가 r 일 때, r 에 대한 승객수의 함수를 $P(r)$ 이라고 하였으며, $P(r)$ 을 기준으로 접근비용을 산출하고, 역의 위치를 결정하였다.

Kikuchi and Vuchic(1982)은 최적의 정차패턴에 대한 연구를 제시하였다. 이들 모형의 목적식은 (i) 전체 승객의 여행시간 최소화와 (ii) 총 비용의 최소화, 2가지를 검토하였다. 여기서 (ii)의 총비용 = 승객에 관련된 비용 + 차량운용에 관련된 비용으로 구성된다. 각 역의 수요(passenger demand rate)는 모든 역에서 동일하다고 가정하고, 각 역에서 승객은 포와송 프로세스(poisson process)에 따라 도착한다고 할 때, 정차역 수의 기댓값 $E(s)$ 을 구하였다. 또 노선 연장길이, 표정 속도, Headway 등의 파라미터에 따른 여행시간의 함수 T 가 연속이고, convex 함수이므로, 최적의 역 수 $= n^* \mid \partial T / \partial n = 0$ 을 구하였다. 또 정차패턴 선정을 위해 $\gamma = E(s) / n^*$ 을 정의하였으며, $\gamma \leq 0.2$ 일 때 Demand Stopping, $0.2 \leq \gamma \leq 0.9$ 일 때 On-Call Stopping, $\gamma \geq 0.9$ 일 때 All-Stop의 정차패턴을 제시하였다⁴⁾. 위의 2가지 연구는 선행연구로서 이론적인 기반을 제시하고 있지만, 다양한 운영패턴에 대한 고려가 부족하다.

Sone(1994)는 기존의 어떤 정차 패턴도 현실의 수요와 제약조건을 만족하면서, 적절한 시간단축과 혼잡(congestion) 완화의 효과를 이룰 수 없다고 강조하고, 다음의 2가지를 제안하였다. 그의 제안은 먼저 문제에 대응하기 위한 대안의 열차 스케줄들을 미리 생성해 두고, 문제가 발생하여 대안을 적용해야 하는 경우 시뮬레이터를 이용하여 최적을 대안을 평가하여 선택하는 방법이다. 이 연구는 운영단계에서 적용 가능성이 매우 높지만 시설 초기단계에서 사업대안 작성을 위해서는 사용될 수 없다.

Seddon & Day(1974)는 맨체스터(Greater Manchester)의 버스승객이 역에 도착하는 패턴을 연구하였다. Seddon & Day(1974)에 따르면 시격(headway)이 긴 경우 승객도착 패턴을 포와송 프로세스로 가정하는 것이 부적합하다고 지적하였으며, 이에 대한 대안을 제시하였다.

원재무 & 황준환(1997)은 우리나라 지하철에 적용 가능한 급행열차 시스템을 고찰하고, 급행열차에 의한 통행시간 절감효과를 분석하였다. 문대섭 & 정병현(2000)은 서울~조치원 구간에 증장거리 전기차량 운행·도입하는 경우 역사 선정에 대한 기초연구를 시행하였고, 서원호(2000)는 수도권 지하철에서 대피선을 고려하지 않는 경우의 SKIP-STOP 운영 시스템 구축에 대해 연구하였다. 김경철(2001)은 기존선 개량을 통한 도시철도 속도향상 방안에 대해 광범위한 기초연구를 실시하였다.

본 논문은 열차가 SKIP-STOP 운행하는 경우 (i) 열차운영패턴 선정과 (ii) 차량소요산정의 정량분석에 대한 논문이다. 서론에서는 연구의 배경 및 국내외의 기존연구에 대해 소개하였다. 본

4) 각 stopping 방법에 대해서는 본문에서 자세히 설명한다.

론에서는 사업대안을 선정할 때 검토해야할 항목들을 요약했고, 열차운영패턴 선정과 차량소요 산정을 위한 수리모형(formulation)을 제시하였다. 결론에서는 연구에 대한 요약과 향후 연구방향에 대해 제시하였다.

2. 본 론

앞에서 언급한 바와 같이 철도 시스템에 대한 사업은 대규모의 예산이 소요되고, 이에 대한 효율적 사용하기 위해서는 최적의 사업대안 작성이 필수적이다. 사업대안 작성을 위해 검토해야할 내용은 매우 많고 복잡하다. 표 1.은 최적 사업대안 작성을 위해 필수적으로 검토해야할 항목들을 간단히 요약한 것으로, 각 세부항목마다 별도의 과제로 검토해할 정도의 분량이다.

본 논문은 위의 항목들 중에서 열차운영패턴 결정과 차량소요 산정의 정량적 분석에 집중하고 있다. 그러나 분석을 정량화하기 위해서는 현재 시간·방향당의 재차인원수로 판단하는 수송수요 예측 데이터를 O&D별, 시간대별로 자세하게 제공하는 것이 필수적이다. 일반적으로 사회·경제적인 현상 전반을 고려하여 파악하는 예측의 정도(resolution)를 O&D별, 시간대별로 자세하게(finier and finier) 예측하는 것이 어렵다고 인식되고 있으나, 이것은 좀더 정확한 의사결정을 위해 필수적인 데이터라고 판단된다. 뿐만 아니라 차량소요 산정에 있어서도 현재 사용하는 피크시의 시간·방향당 수송수요를 기준으로 하는 거시적인 방법으로부터 탈피해야 한다.

2.1 열차운영패턴 선정

Kikuchi & Vuchic(1982)은 운영패턴을 표 2와 같이 3가지로 분류하였으며, 운영패턴의 결정과 관련된 최적화 문제의 목적식으로 (i) 승객 여행시간의 최소화 와 (ii) 총비용의 최소화의 2가지를 제시하였다. 이 논문에서 집중하고 있는 SKIP-STOP 운영은 표 2의 On-call stopping에 해당되며, 비용 최소화 형태의 목적식을 가진 수리모형을 제시하였다.

표 2 정차패턴별 정차수와 정차역의 관계, Kikuchi & Vuchic(1982) Table 1

정차패턴	정차위치	정차수 vs 정차역수
All-stop	고정	정차수=정차역수
On-call stopping	고정	정차수≤정차역수
Demand stopping	가변	요청할 때 마다

일반적으로 열차가 몇 개의 역을 통과하면 All-stop 열차에 비해 운행시간이 단축된다. 이러한

표 1 최적 사업대안 작성을 위한 검토 항목

분야	검토 항목
서비스	수송수요(O&D별, 시간대별), 수송목표(용량, 품질, 가격, 분담율).
노선	역 결정(위치, 용량, 기능, 환승), 기지, 토지수용 결정
운영	배선구조(추월, 교행·대피), 네트워크 용량, 열차운영패턴(정차패턴, 혼합방법), 차량운용(소요, 배차) 결정
신호보안	폐색방식(고정, 이동), 속도제어(속도코드), 연동장치
차량	형식(2층열차, 경량전철), 제원(정원, 가감속, 최고속도) 결정.
궤도·노반	선형(곡선, 구배, 터널, 교량), 선로전환기 통과속도 결정
급전	형식(가공, 3계조), 전압(직류, 교류), 변전소 결정
환경	환경영향

사실은 그림 1과 같은 간단한 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다. 그림 1은 현재 한국철도기술연구원에서 연구 중인 2층 열차를 지금까지 발표된 신분당선의 노선에 적용하여 통행시간을 구한 것이다⁵⁾. 그림 1의 실험조건으로 선로 제한속도는 80km/h 이고, 곡선과 구배에 의한 효과는 직선 및 평탄 구간에 대해 15%를 고려하였다. 그림에서 보는 바와 같이 SKIP-STOP 패턴의 열차는 All-stop 패턴의 열차에 비해 통행시간이 단축된다.

열차운행패턴에 대한 기존연구는 모두 최적의 단일 패턴을 설정하는 문제였다. 그러나 현재 수도권 지하철 1호선 구간(서울역~수원, 용산~부평)의 열차운영패턴은 매우 다양한 패턴을 갖는다. 즉 현실의 열차운영패턴은 복수의 정차패턴(heterogeneous stop patterns)을 가정해야한다. 다음에 비용 최소화 목적 관련한 개념적인 수리모형(sketch formulation) 2가지를 제시한다.

<Notation>

- i - 열차 번호
- j - 운용 번호
- k - 차종 번호
- t - 역 번호
- p - 정차패턴 번호
- F - 정차횟수에 대한 상수
- ST_i - i -열차의 정차횟수
- Q^k - k -차량의 1회 수송용량
- D_t - t -역의 1일 수요
- S_t - t -역의 1일 수송용량
- TD_i - i -열차의 시발역 출발시각
- TA_i - i -열차의 종착역 도착시각
- TR_i - i -열차의 최소 반복시각
- R_i - i -열차의 반복운행 횟수
- A_{ip} - p -패턴에 의해 t -역에 제공되는 수송용량
- C_{ik} - i -열차에 k -차량 사용에 대한 비용
- C_{jk} - j -운용에 k -차량 사용에 대한 비용

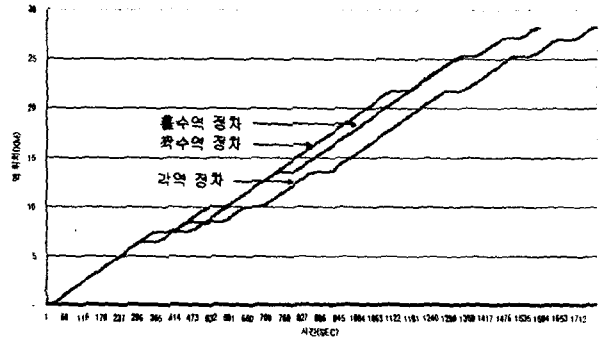


그림 1 정차패턴별 통행시간(신분당선 예제)

(PI-1)

$$\min \sum_{i,t,k} C_{ik} \cdot X_{it}^k \quad (1-1)$$

subject to

$$\sum_{i,k} Q^k \cdot X_{it}^k \geq D_t, \quad \forall t \quad (1-2)$$

$$\sum_t (X_{it}^k + X_{i,t+1}^k) < 1.5, \quad \forall i, t \quad (1-3)$$

$$X_{it}^k = 0, \quad \forall t \text{ and } i = \{i \mid ST_i > F, ST_i = \sum_{i,k} X_{it}^k \quad \forall i\} \quad (1-4)$$

$$X_{it}^k \in \{0, 1\}, \quad \forall i, t, k \quad (1-5)$$

문제 (PI-1)의 결정변수 X_{it}^k 는 t -역에 정차하는 i -열차가 k -차종이면 1의 값을 갖고, 그렇지

5) 김형진(철도연), 2층 및 급행열차 운영을 위한 기술개발 및 설계기준에 관한 연구, 건설교통부

않을 경우에는 0의 값을 갖는다. 식(1-1)은 정차패턴에 따른 비용을 최소화하는 목적식이고, 식(1-2)는 역별 수요에 대한 제약이다. 식(1-3)은 하나의 패턴내에서는 차종이 동일함을 나타내고, 식(1-4)는 F회 이상 정차하는 패턴에는 2층 열차를 할당할 수 없는 제약이다.

(PI-2)

$$\min \sum_t (S_t - D_t) \quad (2-1)$$

subject to

$$S_t \geq D_t, \quad \forall t, \quad S_t = \sum_p A_{tp} \cdot X_p \quad (2-2)$$

$$X_p = \text{integer}, \quad \forall p \quad (2-3)$$

문제 (PI-2)의 결정변수 X_p 는 미리 정해진 패턴 p 가 사용되는 횟수이다. 식(2-1)은 수송용량의 초과공급을 최소화하는 목적이고, 식(2-2)는 역별 수요에 대한 제약이다.

	1	2	3	4	n	
j=1	1	2	3	4	n	all stop
j=2	1	2	3	4	n	all stop
	1	●	●	●	n	skip-stop
	1	2	3	4	n	all stop
	1	2	3	4	n	all stop
	1	●	●	●	n	skip-stop
	1	2	3	4	n	all stop
j=m	1	2	3	4	n	all stop

그림 2 문제 (P-1)에 대한 정차패턴

문제 (PI-1)과 (PI-2)에 대한 예제를 LINGO 7.0을 이용하여 풀어본 결과 처음에 의도한 것과 같은 형태의 해를 제시하였으며, 그 결과는 그림 2와 같은 형태로 제시된다. 그러나 (PI)의 모형은 모두 비용 최소화를 목적으로 하므로, 가능한 범위 내에서 주어지는 차량의 용량을 가득 채우려고 하는 해를 제시한다. (PI) 모형을 이용하여 용산~인천간의 운행패턴을 구하는 실험에서 모든 열차의 탑승률(load factor)이 90% 이상을 나타냄바 있으며, 이것은 피크시간대외에는 비현실적인 상황이 된다. 이것은 (PI)에서 역별 수요 D_t 가 시간에 따라 상수가 아님을 나타낸다. 현재 일반적으로 적용되는 피크시 시간·방향당의 수송수요 예측방법에 의한 정보가 부족한 이유가 여기에 있다. 열차 운영패턴에 관한 기존연구(Seddon & Day(1974), Hurdle & Wirasinghe(1980), Kikuchi & Vuchic(1982) 등)들은 모두 역별 수송수요를 처리하는 방법에 관심을 집중하였고, 이에 따라 각 역에 도착하는 모든 승객의 전체 여행시간 최소화과 같은 목적을 고려하였다.

2.2 차량소요 산정

차량소요 산정에 있어서도 현재는 다음과 같은 간략한 식에 따른다.

$$\text{소요차량} = \frac{\text{피크시 시간} \cdot \text{방향당 수송수요}}{\text{차량정원} \times (\text{주행시간} + \text{반복시간})}$$

그러나 이 식에서도 분자 부분에 피크시 시간·방향당 수송수요를 고려하고 있으므로 좀더 세부적으로 검토해야할 부분이 있다. 이에 대한 대안으로 다음과 같은 수리모형을 제시한다.

(PⅡ)

$$\min \sum_{j,k} C_{jk} \cdot Y_{jk} \quad (2-1)$$

subject to

$$\sum_j X_{ij} = 1, \quad \forall i \quad (2-2)$$

$$\sum_j X_{ij} < R_i, \quad \forall j \quad (2-3)$$

$$(TA_{i-1j} + TR_j) \cdot X_{i-1j} - TD_i \cdot X_{ij} \leq 0, \quad \forall i, j \quad (2-4)$$

$$\sum_k Y_{jk} = 1, \quad \forall j \quad (2-5)$$

$$X_{ij} = \{0, 1\}, \quad \forall i, j \quad (2-6)$$

$$Y_{jk} = \{0, 1\}, \quad \forall j, k \quad (2-7)$$

문제 (PⅡ)의 결정변수 X_{ij} 는 i -열차가 j -운용에 할당되면 1의 값을 갖고, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 또 Y_{jk} 는 j -운용에 k -차량이 할당되면 1의 값을 갖고, 그렇지 않으면 0의 값을 갖는다. 식(2-1)은 차량 사용비용을 최소화하기 위한 목적식이고, 식(2-2)는 열차와 운용간의 coverage에 대한 제약이다. 또 식(2-3)은 운용의 최대길이에 대한 제약이고, 식(2-4)는 열차간 착발순서에 대한 제약이다.

이 문제는 주어진 열차의 수를 만족하는 최소비용의 차량수를 결정하는 문제이다. 실제로 사업대안 작성을 위한 차량수는 (PⅡ)와 같은 방법으로 구한 차량수에 검수(maintenance) 및 대기에 소요되는 차량의 수를 합한 값이 된다. 검수 차량의 수량 결정은 검수기지의 용량에 따라 결정되며, 이 부분은 다시 면밀하게 검토되어야 할 부분이다.

4. 결 론

지금까지 광역철도에서 사업대안을 작성하기 위해 검토하는 부분 중에서 SKIP-STOP 열차 운영에 따른 열차운영 패턴 및 차량소요 산정의 정량분석 방법에 대해 개념적으로 서술하였다. 서론에서는 국내외의 기존 연구에 대해 고찰하였다. 국외 연구는 80년의 연구가 주류였으며, 승객의 역도착에 대한 확률모형을 근간으로 역수, 정차패턴 및 비계약에서의 운행시간 최소화에 대한 연구에 집중하였다. 반면 국내 연구는 90년 이후가 주류를 이루고 있으며, 시뮬레이터를 개발하여 검토하는 방법(서원호(2000), 김경철(2001))이 주로 사용되었다.

이 논문에서는 열차운영 패턴 및 차량요소 산정에서 비용관련 목적을 달성하기 위한 수리모형 기반 최적화 기법을 통해 정량분석의 절차를 제시하고자 하였다. 열차운영 패턴에 관한 모형 2가지와 차량소요 산정에 관한 모형 1가지를 제시하였다. 또 이러한 절차가 적용되기 위해서는 수송 수요 예측방법이 더 정밀해지고 세부적이어야 함을 강조하였다.

본 논문의 모형은 일종의 개념식으로서 향후 많은 양의 추가 연구가 필요하다. 특히 시간대별로 동적(dynamic)인 수요의 형태, 각 역의 모든 승객에 대한 여행시간 최소화 목적과 관련된 문제 또 복수형태의 패턴에 의한 최적조합의 형태 등에 대해 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

광역철도의 최적대안 선정은 한두 가지의 항목으로부터 결정되는 것은 아니고 표 1과 같은 다양한 부분의 경제성 검토가 이루어져야 한다. 따라서 모든 부분에 대한 경제적 효과를 표현하는 전체 네트워크 비용 모델(Global Network Cost Model)의 개념하에서 대안을 선정하는 정량분석

모형이 필요하다고 판단된다. 또 본 논문에서 제시하는 모형들은 이러한 전체 네트워크 비용 모델의 작은 일부분이 된다.

참고문헌

1. 손의영, "21세기 도시교통정책의 방향", 월간교통(2002).
2. 임강원, "21세기 철도교통정책의 방향", 월간교통(2002).
3. 이창훈(KOTI), 수도권 철도의 건설계획 및 운영체계 개선방안, 연구총서 98-16
4. 김경철, "기존선 개량을 통한 도시철도 속도향상방안 기초연구", 서울시정개발연구원, 2001.
5. 서원호, "철도 Skip Stop System 구축에 관한 연구 -대피선을 고려하지 않는 경우-", 서울대학교 대학원 토목공학과 도시공학전공 석사학위 논문, 2000
6. V. F. Hurdle and S. C. Wirasinghe, "Location of Rail Station for Many to One Travel Demand and Several Feeder Modes", Journal of Advanced Transportation Vol. 14, 1980.
7. Shinya Kikuchi and Vukan R. Vuchic, "Transit Vehicle Stopping Regimes and Spacings", Transportation Science vol. 16, no. 3, August 1982, pp. 311~331.
8. Satoru Sone, "Novel Train Stopping Patterns for High-Frequency, High-Speed Train Scheduling", Computers in Railway, 1994.
9. P. A. Seddon and M. P. Day, "Bus passenger waiting times in Greater Manchester", Traffic Engineering & Control no. 15, 1974. 1.
10. 원제무, 황준환, "급행 지하철의 시간절감 효과분석 연구", 대한국토·도시계획학회지 「국토기획」, 제32권, 제6호, 1997. 12, 121~130.
11. 문대섭, 정병현, "철도수송수요를 고려한 정차역 선정과 열차운행 방안", 2001년도 학국철도학회 춘계학술대회 논문집