

급행·완행 결합 운행에 따른 수송량 및 소비 에너지의 변화

양 경록, 김 재환, 진 인수, 류 형선, 김 시구, 김 양모
충남대 전기공학과

A Study on the Change of Energy Consumption and Transport Capacity Depending upon the Train Operation Mixing Slow Trains and Fast Trains

Kyeong-Rok Yang, Jae-Hwan Kim, In-Su Jin, Hyung-Sun Ryu, Si-Ku Kim, Yang-Mo Kim
Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University

Abstract - The train system in a big city has the serious problem of the shortage of transport capacity. And because of the nowadays energy crisis, the research to reduce the energy consumption in the train system has been progressed.

In this paper, it is expected that the train operation mixing slow trains and fast trains enable us to increase transport capacity and to reduce energy consumption.

In this paper, the train operation mixing slow trains and fast trains is modelled and the change of energy consumption and transport capacity depending upon the operation formation is simulated.

단위 시간에 운전 가능한 열차 수는 역의 배선, 열차 시간, 열차 성능, 신호 방식, 열차다이아 패턴 등 많은 제약 조건에 따라 그 상한이 결정된다. 편성 차량수는 수송력이 부족한 선로에서도 10량이 일반적이며 이는 서울 지하철에서 볼 수 있으며, 새마을 호와 같이 2편성 16량의 편성 형태도 볼 수 있다. 또한 수송량을 증가시키기 위해서는 차량의 바닥 면적을 증가시킬 수 있는데 열차 폭을 넓히거나 열차의 길이를 늘리거나 혹은 2층 구조로 할 수 있지만 이들 모든 것은 열차 계획 단계에서 수립될 수 있는 것으로 본 논문에서 논하고 있는 범위를 벗어나는 논리라 볼 때 1량의 바닥 면적 즉 정원은 정해진 것으로 간주할 필요가 있다.

1. 서 론

현재 대도시 교통기관이 갖는 문제점으로는 수송력 증강과 수송 비용 절감 등을 들 수가 있다. 특히 대도시 철도의 경우 수송력 부족으로 고민하게 되어 열차 편성을 길게 하거나, 증편함으로써 수송력을 증가시키기 위해 나름대로 노력하여 왔지만 결국 개찰 중지나 콩나물승차만에 의존하는 것이 현실이다. 또한 현대 에너지 위기에 따른 에너지 절약에 대한 연구가 활발히 거론되고 있다. 특히 철도에 있어서도 에너지 절약을 달성하고자 하는 노력이 진행되고 있으며, 에너지 절약형 전기차의 개발[3], 열차 운행에서의 에너지 절약책[4], 회생 에너지의 이용방안[5] 등 다양한 방법으로 진행되고 있다.

본 논문에서는 이러한 대도시 교통기관이 안고 있는 문제점을 해결할 수 있는 방안으로써 현재 우리나라의 경부, 호남선에서 볼 수 있는 형태인 급행·완행 결합형 운행을 제시하고자 한다. 가까운 일본을 비롯한 외국의 예로는 대도시 통근 구간에서 이러한 운행 형태가 취해지고 있으며 통근 구간의 역간 거리는 짧고 제동과 가속이 빈번히 일어나 수송력 증강과 에너지 절약이라는 두 가지 효과는 더욱 더 클 것이라고 생각된다[6]. 아직 우리나라의 대도시에서는 이러한 형태의 운행 모델을 택하고 있지 않다.

본 논문에서는 수송량 증가를 꾀할 수 있는 급행·완행 결합형 열차 운행 형태의 모델링과 수송량 변화에 대하여 논하고자 하며, 급행·완행 결합형 운행에 의한 소비 에너지의 절약 효과를 기본 운행 모델을 정의함으로써 정량화 하고자 한다.

2. 수송량과 소비 에너지

2.1 수송량

하나의 노선에 대해 수송력이란 단위 시간에 운반할 수 있는 여객의 수 혹은 화물량이며 기본적으로는 단위 시간에 주행하는 열차의 정원의 합계라 생각할 수 있다. 즉 수송력은 식(1)과 같다.

$$\text{수송력} = \frac{\text{열차수}}{\text{단위시간}} \times \text{편성 차량수} \times \frac{\text{정원}}{\text{차량}} \quad (1)$$

2.2 운전 소비 에너지

2.2.1 열차의 운행 패턴

그림 1-(a)에서와 같이 열차가 주어진 시간동안 A에서 B역까지 운전될 때 연속 운전 상태를 가정하면 열차에 운동에너지를 주는 구동과 정지시키기 위한 제동, 동력을 끊고 타력과 열차저항에 따라 운동하는 순항의 3가지 운전 상태의 조합으로서 비교적 짧은 구간의 역간 주행이 이루어진다. 역간 거리가 비교적 클 경우 위의 운행패턴으로 운전하기 어려우며 이때 역간 운전 시간은 열차의 성능상 최단운전시간 외에 어느 정도의 여유시간이 포함되어 있는 것과 선로상 한정되어 있는 속도 제한이나 열차 속도와 함께 증가하는 열차 저항 때문에 나타나는 최고 속도의 제한 등이 있어 역 출발시의 구동 상태와 역에서의 정지를 위한 제동 상태의 사이에는 세가지의 운전상태의 조합이라고 하는 자유도가 주어지고 있지만 이 부분의 운전 방법은 등속에서 가까운 운전 상태를 유지하며 그림 1-(b)에서와 같이 일반적으로 구동과 순항 상태를 서로 번갈아 가며 운전하게 된다.

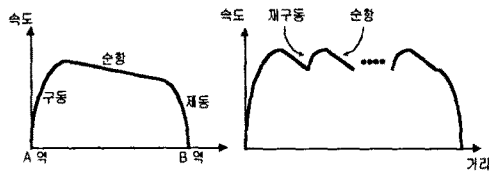


Fig 1. 거리에 따른 운행 패턴

2.2.2 열차의 운동 방정식

열차의 운동 방정식은 열차의 운전 거리를 s, 운전 시간을 t, 속도를 v라 할 때, (2)식과 같다.

$$\frac{W}{g} \frac{dv}{dt} = F(v) - R(v, s) - B(v) \quad (2)$$

W : 열차 중량, F(v) : 모터의 견인력
R(v, s) : 열차 저항, g : 중력 가속도

식 (2)의 좌항은 유효 견인력으로써 가속도와 실제 질량에 관성 질량을 포함한 동적 질량의 곱으로 나타낼 수

있으며, 본 논문에서의 전차의 경우 유효견인력 $f=31.2a[\text{kg/t}]$ (a 는 열차의 가속도)이다. 유효 견인력은 모터 견인력과 열차 저항, 제동력으로 나타낼 수 있으며 이들은 앞에서 말한 3가지의 운전 패턴 구간에 따라 다르다. 구동 구간은 일반적으로 열차의 전동기에 의해서 구동되는 구간으로써 견인력과 열차 저항 성분만이 존재하며 $B(v)=0$ 를 만족한다. 순항 구간은 전동기의 동작을 멈추고 탄력 운전이 이루어지는 구간으로 $F(v)=B(v)=0$ 를 만족한다. 제동 구간은 일정 거리내에서 열차를 정지시키거나 의도적으로 감속시키는 구간으로 $F(v)=0$ 이며, $B(v)$ 의 경우 비상시와 정상시의 계통을 설명하여 놓고 있지만 본 논문에서는 정상시의 등감속 함수로 하였다. 이러한 조건에 따라 각 운동 구간에 열차 운동을 나타내는 거리와 시간이 구해질 수 있으며 각 운전 상태의 가·감속도를 $\alpha(v)$ 라하고 속도 v_i 에서의 운동 방정식의 해인 거리, 시간의 변화량 Δs , Δt 는 속도의 변화량 Δv 로 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t = \frac{\Delta v}{\alpha(v)} \quad (3)$$

$$\Delta s = v_i \cdot \Delta t \quad (4)$$

2.2.3 열차저항

열차저항은 열차의 기동이나 주행시 열차의 운동을 방해하려는 힘이며, 많은 인자들에 영향을 받으므로 실제적으로 매우 복잡하다. 일반적으로 열차저항은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R(v, s) = R_s(v) + R_r(s) \pm R_g(s) + R_c(v) \quad (5)$$

$R_s(v)$:출발저항, $R_r(v)$:주행저항, $R_g(s)$:비탈저항, $R_c(s)$:곡선저항
 식 (5)에서와 같이 열차저항은 열차의 출발저항, 주행저항, 곡선저항, 비탈저항 등으로 구분되어 선로위치의 함수라고 할 수 있지만 여기에서는 평탄선을 가정하여 주행저항과 출발저항에 의한 속도만의 함수로 취급하였으며 식 (6)과 같다.

$$R(v) = 1.32 + 0.0164v + (0.028 + 0.0078(N_c - 1))v^2/W \quad (6)$$

단, N_c 는 차량수, W 는 열차의 중량을 나타내며 출발저항은 출발시 $3.0[\text{kg/t}]$ 에서 속도 10km/h 에서 열차의 주행저항 $R(v)$ 와 일치하도록 근사화하였다[7].

2.2.4 운전 소비 에너지

앞에서 논의한 4가지의 운동상태, 즉 구동, 순항, 등속, 제동 중에서 열차에 운동 에너지를 주게 되는 것은 구동 및 등속 운전 상태이다. 열차 내에서는 열차의 움직임에 쓰이는 에너지 외에 보조 기기(실내 조명등, 에어컨 등)의 소비 에너지도 있으나, 본 논문에서는 고려하지 않기로 한다. 전기차의 경우 주어진 전차선 전압에 대하여 열차 속도에 대한 전력함수 $p(n, v)$ 를 전기차 특성 곡선으로 구할 수 있으며 그림은 서울 지하철 1호선의 경우의 저항 제어차의 예이다. 이때 n 은 전기차에 주어진 가속량을 정하는 notch 번호를 의미한다.

소비에너지 계산은 속도의 미소 변화량 Δv 에 대해 에너지 변화량 ΔE 를 구함으로써 계산할 수 있으며, 열차가 출발에서부터 가속을 멈추고 순항으로 옮기는 notch-off 속도 v_{off} 까지의 소비되는 에너지 E 는 식 (7)과 같다.

$$E = \int_0^{v_{off}} p(n, v) v dv \quad (7)$$

관련 등속 운전으로 일컬어지는 구간에서의 소비에너지는 재구동, 순항에 의한 등속 운전을 가정한다면 속도의 미소 변화량 Δv 에 대하여 각각의 운전 상태의 소요 시간을 계산할 수 있고 이 시간적 비율로 등속 운전 구간의 소비에너지를 계산할 수 있다. 즉 재 구동 및 순항 운전 상태의 시간적 변화량 ΔT_{ra} , ΔT_c 라 하고 등속 운전 구간의 평균속도를 V_c 라 하면,

$$\Delta T_{ra} = \frac{m}{F(V_c)} \Delta v \quad (8)$$

$$\Delta T_c = \frac{m}{R(s, V_c)} \Delta v \quad (9)$$

으로 구해지며, 근사적 등속 운전 시간을 T_{vc} 라 하면, 이 구간의 소비에너지 E_{rn} 는 식 (10)과 같다.

$$E_{rn} = P(n, V_c) \frac{\Delta T_{ra} T_{vc}}{\Delta T_{ra} + \Delta T_c} \quad (10)$$

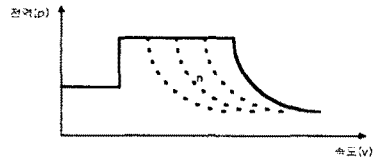


Fig 2. 전력 함수 $P(n, v)$

3. 열차 운행 형태와 그 모델링

3.1 전제 조건

계산상의 편의와 논의되는 변화량의 추이로부터 정량적인 해석을 하기 위해 다음과 같이 노선 및 열차의 성능에 대해 가정한다.

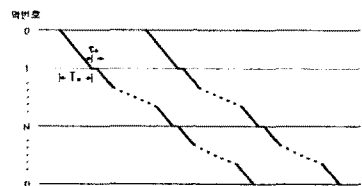
(1) 일반적으로 단말 역에서의 승객의 대기 패턴은 중간 역과 상이하며 본 논의에서 모든 역은 중간역이라고 하고 각 역 사이의 거리는 일정하다고 가정한다.

(2) 승객의 급행, 완행 열차의 선택 패턴은 열차의 운행 시간, 역구간의 이동거리, 급행의 통과 역수 등에 의해 결정되나, 임의의 역에서의 급행, 완행 선택률은 동등하다고 가정한다.

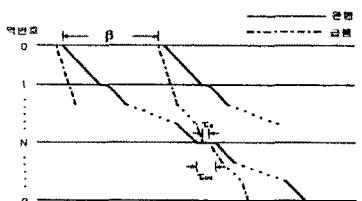
(3) 역 구간에서의 열차 속도는 경사구간, 곡선구간, 분기기 등 선로 조건에 따라 속도의 제약을 받으며 제한 속도 내에서 적절한 운전이 이루어지게 되는데 본 논문에서는 최고 속도 내에서 속도 제한 구역은 없는 것으로 가정한다.

3.2 선로 모델

앞에서 논한 바와 같이 단순화한 선로 모델로부터 계산 결과를 통한 일반적인 해석 결과를 얻을 수 있고 또한 계산 과정도 비교적 간단하게 수행할 수 있다. 또한 각 역간 거리 및 선로를 주행하는 열차 성능도 모두 같다고 가정하여 그림과 같은 각 역 정차 모델과 임의의 N 역 대피 모델을 설정하고 수송량과 소비 에너지를 계산한다.



(a) 각 역 정차



(b) N역 대피

Fig 3. 급행·완행의 대피 모델

그림 3에서와 같이 본 논문에서 다루고 있는 주행 시간의 차이만을 부각시키기 위하여 각 역 정차 열차를 기준으로 통상적으로 소요되는 시간, 즉 운행 시간과 역 정차 시간을 직선으로 나타내고, 이에 기준하여 N형 대피 모델을 나타내면 그림 4와 같다.

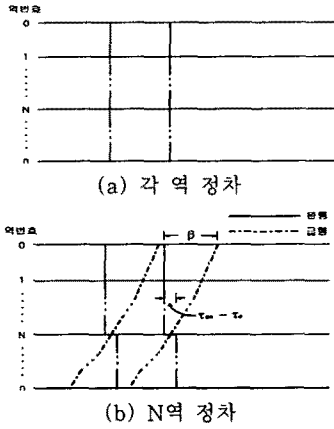


Fig 4. 간략화한 운행 모델

그림 3과 그림 4에서의 파라미터들은 다음과 같다.

- T_0 : 각 역 정차 열차의 역간 주행시간
- τ_0 : 각 역 정차 열차의 역 정차시간
- τ_e : 급행 열차의 역 정차시간
- τ_{os} : 각 역 정차 열차의 대피역에서의 역 정차시간
- β : 급행의 운전 단축 시간

N역 대피 모델에서 N역간 운행중 급행이 단축하는 시간 β 는 식 (11)과 같다.

$$\beta > (N - 1) \cdot \tau_0 \quad (11)$$

로 나타낼 수 있으며, 단축 시간 β 는 각 역 정차 열차가 역에 정차하는 시간외에 정차하기 위하여 제동과 가속 시간이 부가되어 $(N - 1) \cdot \tau_0$ 보다 훨씬 크고 이를 바꿔 말하면 급행 열차의 운행 시간에는 많은 여유가 포함되어 있음을 의미한다. 한편, 표준 운행 모델은 N역 중 역 번호 0 ~ N의 운행 모델이 되풀이 된다고 볼 때 소비 에너지나 수송량의 이론은 이 구간만을 대상으로 계산함이 계산상의 복잡함을 피할 수 있다.

4. 시뮬레이션 결과

4.1 수송량 일정시 소비 에너지의 변화

각 역 정차 모델과 임의의 N 역 대피 모델에서 단위 시간에 어떤 역에 도착하는 열차의 수가 같을 때 이를 수송량이 동등하다고 볼 수 있다. 이 때 대피 역에서의 승객의 선택 기준은 다양한 요인에 의해 결정되지만 대피 역에서의 승차차량은 급행 열차가 각 역 정차 열차보다 N 배정도 많다고 보는 것이 일반적이다.

$$R_E = \frac{N \text{ 역 대피 모델의 소비 에너지}}{\text{각 역 정차 모델의 소비 에너지}} \quad (12)$$

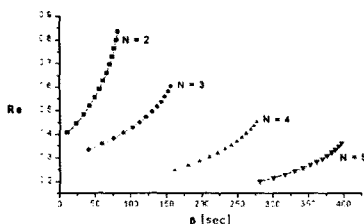


Fig 5. β 에 따른 소비에너지 비율 R_E

각 역 정차 모델의 소비 에너지를 1로 보았을 때 N과 β 의 변화에 대한 소비 에너지의 비율(R_E)를 계산하여 그림으로 나타내면 그림 5와 같으며, 이 그림에서 알 수 있듯이 N을 크게 할수록, 또한 β 를 작게 할수록 소비 에너지는 감소함을 알 수 있다.

4.2 소비 에너지 일정시 수송량의 변화

여기에서는 소비 에너지를 같게 했을 때, 즉 N 역 대피 모델에서 급행의 운행시간을 단축하면 그만큼 수송량이 증가하게 된다. 이 수송량의 증가량을 각 역 정차 모델을 1로 했을 때의 비율(R_M)으로 나타내면 그림 5-4와 같다. 이때 R_M 은 식 (12)와, 같다.

$$R_M = \frac{N \text{ 역 대피 모델의 수송량}}{\text{각 역 정차 모델의 수송량}} \quad (12)$$

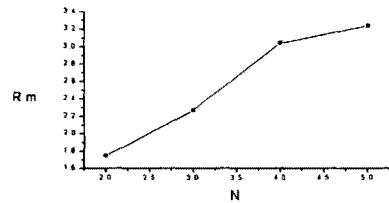


Fig 6. N에 따른 수송량의 비율 R_M

그림 6에서 알 수 있듯이 대피 역수가 증가시킴으로써 같은 에너지를 사용하며 수송량을 증대시킬 수 있음을 보여준다.

5. 결론

본 논문에서는 대도시 통근 구간에서의 수송량 증가와 소비 에너지의 절약을 피할 수 있는 급행·완행 결합형 열차 운행 형태를 다루었으며, 수송량의 증가량 및 에너지 절약 효과를 계산하여 보았다. 먼저 운행형태의 모델링을 비롯하여, 소비 에너지의 계산 프로그램을 작성하였고, 수송량을 일정하게 했을 때 모든 열차가 모든 역에 정차하는 형태와 임의의 N 역마다 대피시킬 때의 소비 에너지를 각각 계산하여 에너지 절약 효과를 논하였으며, 또한 소비 에너지를 일정하게 했을 때 대피역의 변화에 대한 수송량 증가 효과에 대하여 논하였다.

본 논문에서는 임의의 N 역에서 대피하는 급행·완행 단순 결합형 운행 모델에 대해서만 논하였는 바, 복수 열차가 대피하는 운행 모델과 복복선을 가정한 운행 형태에서는 수송량 증강과 에너지 절약 효과는 더욱 크리라고 기대된다.

[참고 문헌]

- [1] P. G. Howlett, P. J. Pudney, Energy-efficient Train Control, pp. 1-32, Springer, 1995.
- [2] 林岡源, 都市交通計劃, 서울대학교 출판부, 1986.
- [3] M. Losada, "Indicator for Measuring the Energy Efficiency of Railways and other modes of Transport", Rail International, 1982. 6.
- [4] 木村, 古賀, "에너지-最小을考慮した列車運轉曲線の作成", 計測と制御, Vol. 19, No. 10, 1980. 10.
- [5] 永見, 笠原, 小西, 上田, "電力回生車と電力逆電所の効果について", 近畿日本鐵道技報, Vol. 12, 1981.
- [6] 荒室, 曾根, "都市系軌道輸送システムの列車群制御シミュレーションによる特性解析", 電氣學會論文誌, Vol. 101, No. 4, 56-C14, 1981. 4.
- [7] 日本國鐵技術開發室編, "技術要覽", p. 35, 1984. 3.