

도시철도 신호시스템 설계에서의 운전시각 향상에 대한 연구

백종현\*, 안태기, 정락교, 한성호, 변윤섭, 박현준  
한국철도기술연구원

The Study of Headway Improvement  
on Signaling System Design of Urban Transit

Jong-Hyen Baek, Tae-Ki An, Rag-Gyo Jeong, Seong-Ho Han, Yeun-Sub Byun, Hyun-Jun Park  
KRRRI(Korea Railroad Research Institute)

**Abstract** - To improve safety operation of urban transit, compatible design of signaling system is most important factor at future train operation and management. Therefore, signaling system should be designed compatible transport demand of target year. In addition, signaling system should be designed improved train safety, based fail-safe principle. Most of all, to solve passenger concentration, high density and to improve efficiency of train operation, Headway improvement of train is most important. Train organization length of new urban transit as light rail is generally shorter than EMU. Therefore, to increase passenger service and operation efficiency, minimum headway of one minute in this system should be important required.

성능최고속도 : 80 km/h 이상  
최고운행속도 : 70 km/h 이상  
가속도 : 3.96 km/h/s  
감속도 : 4.68 km/h/s  
표정속도 : 30 km/h 이상  
차체길이 : 9,140 mm(1량 기준)  
차량편성 : 4량 편성  
운전시각 : 1 min  
정차시간 : 20 sec  
총연장 : 11.7 km  
정차장 : 13 개소

1. 서론

국내 도시철도의 신호시스템은 고정폐색방식(Fixed Block System)에 의한 차상신호방식을 사용하고 있다. 이러한 방식은 지상신호방식보다 안전성, 신뢰성 측면에서 뛰어나다는 장점이 있으나 선구의 운전시각이 궤도회로에 의한 폐색구간에 의해 결정되고 궤도회로 장치의 수량이 이동폐색방식(Moving Block System)보다 증가하여 시설비가 늘어나는 단점 또한 지니고 있다. 이에 전세계적으로 이러한 고정폐색방식의 단점을 극복하기 위해 이동폐색방식의 적용이 점차로 늘어나고 있는 추세이다. 이동폐색방식은 무선신호 전송매체를 이용하여 선행열차의 위치, 속도 등의 신호상태를 후속열차가 지상신호설비나 선행열차로부터 직접 수신하여, 차상에서 열차간격을 조정하므로써 선행열차와의 안전거리를 확보하는 방식이다. 그림 1은 고정폐색방식과 이동폐색방식의 일반적인 운전곡선도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 고정폐색방식은 선행열차가 점유하고 있는 폐색구간에는 후속열차가 진입할 수 없으므로 폐색구간의 길이에 의해 보다 많은 선행열차와의 안전거리를 유지하여야만 한다. 그러나 이동폐색방식의 경우에는 폐색구간에 제한받지 않기 때문에 고밀도의 열차운행이 가능하므로 운전시각을 1분까지도 단축시킬 수 있다.

본 논문에서는 도시철도 신호시스템의 설계시 최소운전시각을 1분으로 설정하고, 수식적 접근과 TPS(Traffic Performance Simulation : 열차주행성능시뮬레이션) 이용하여 설정된 최소운전시각이 적합한지 검토하였다.

2. 본론

2.1 운전시각의 수식적 검토

본 논문에서 적용하고자 하는 노선의 조건은 다음과 같으며 주어진 역의 위치 및 구배는 표 1과 같다.

최대 구배 : -37.3 %  
최소곡선반경 : 본선 60 m, 측선 40 m

표 1. 노선의 역의 위치와 구배

역	역 위치	거리	구배
ST 0	0 m	0 m	-3 %
		338.84 m	-23.4 %
		663.84 m	-15.2 %
ST 1	1102.84 m	1043.84 m	-3 %
		1428.84 m	26 %
ST 2	1797.84 m	1643.84 m	3 %
		1903.84 m	7.3 %
ST 3	2479.84 m	2383.84 m	-3 %
		2563.84 m	-37.3 %
ST 4	3147.84 m	2733.84 m	5 %
		3323.84 m	7.95 %
ST 5	3837.84 m	3743.84 m	5 %
		4043.84 m	26 %
ST 6	4867.84 m	4683.84 m	-8 %
		5003.84 m	-29.9 %
ST 7	5707.84 m	5583.84 m	-3 %
		5903.84 m	-13.9 %
		6223.84 m	45 %
ST 8	6557.84 m	6543.84 m	3 %
		6703.84 m	45 %
		7143.84 m	9.2 %
ST 9	7722.84 m	7612.84 m	3 %
		8002.84 m	11.7 %
		8532.84 m	20.5 %
ST 10	9182.84 m	9102.84 m	3 %
		9342.84 m	15.5 %
		9572.84 m	13.3 %
ST 11	10282.84 m	10082.84 m	3 %
		10682.84 m	13.98 %
ST 12	11712.84 m	11622.84 m	-3 %

이러한 노선조건에 의해 본선구간과 역구간의 두 부분에 대해 검토하였다. 물론 회차 시간이 운전시격에 중요한 영향을 미치지만 자동회차 또는 무인운전방식을 적용할 경우 이는 문제가 되지 않는다.

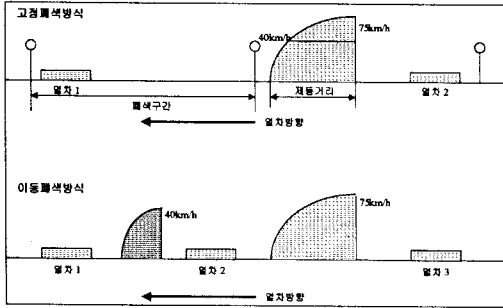


그림 1. 운전곡선도

### 2.1.1 본선구간에서의 최소운전시격

선행열차와 후속열차 사이의 간격은 실제 제동거리 제동지점에서 제동시까지의 공주거리와 여유거리의 합산으로 이루어지며 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격  $Li$ 는 다음의 식(1)과 같다.

$$Li = \frac{V_{max}^2}{7.2 \times (\beta + \frac{S}{31})} + \frac{V_{max}^2}{3.6} \cdot t + \text{여유거리} \quad (1)$$

여기에서,  $Li$  : 본선구간에서의 열차간격(m)  
 $V_{max}$  : 역간 최고속도(km/h)  
 $\beta$  : 감속도(km/h/s)  
 $S$  : 구배상수(최대구배)  
 $t$  : 공주시간(sec)

운전시격  $Hi$ 는 다음의 식(2)에서 얻어진다.

$$Hi = 3.6 \times \frac{Li + \text{열차길이}}{V_{max}} \quad (2)$$

주어진 노선의 조건과 식(1)과 (2)에 의해 본선구간 운전시의 최소운전시격 15.64sec로 계산되었으나 실제 운전에서 있어서는 이외에도 역간 선로조건에 따른 곡선 및 역간 거리, 역간 속도 등에 따라서 변동될 것이다. 본 논문에서는 구배에 따른 영향에 대해서만 고려하였다.

본선구간에서의 최소운전시격은 1분으로도 충분하지만 실제 운전에서 있어서는 역간거리가 짧아 주행시간이 적고 선행열차의 정차시간 등으로 인하여 역간 운전에서 있어 최소운전시격은 이론상의 결과로 보아야 할 것이다. 이를 보완하기 위하여 역구간의 최소운전시격을 검토하여야 하며, 또한 TPS를 이용하여 확인하여야 한다.

### 2.1.2 역구간에서의 최소운전시격

역구간에서의 최소운전시격은 선행열차가 역에 정차한 후, 역을 출발하여 후속열차가 역에 진입할 수 있도록 허용되기까지의 후속열차와의 간격에 의해 결정되며, 선행열차가 발차하는 시점에서 후속열차와의 간격  $Ls$ 와 이때의 최소운전시격  $Hs$ 는 다음의 식(3)과 (4)와 같다.

$$Ls = \frac{V_{max}^2}{7.2 \times (\beta + \frac{S}{31})} + \frac{V_{max}^2}{3.6} \cdot t + \text{여유거리} + \text{열차길이} \quad (3)$$

$$Hs = 3.6 \times \frac{Ls}{V_m} + Ts + Ta \quad (4)$$

여기에서,  $Ls$  : 역구간에서의 열차간격(m)  
 $V_m$  :  $V_{max}$ 에서 정차하기까지의 평균속도(km/h)  
 $Ts$  : 정차시간(sec)  
 $Ta$  : 발차후 열차후미가 플랫폼을 빠져나가 후속열차의 진입이 허용되기까지의 시간(이동폐색방식의 신호시스템에서는 무시할 수 있다.)

주어진 노선조건과 식(3)과 (4)에 의하여 열차간격  $Ls$ 는 312.79m가 얻어지며, 이때 이동폐색방식을 적용한 시스템이라면 운전시격  $Hs$ 는 48.15sec이다. 따라서 역구간에서의 최소운전시격은 설정된 1분의 최소운전시격보다 약 20% 정도의 여유를 가지고 있다.

위의 식(4)는 폐색거리를 고려하지 않았을 때의 최소운전시격을 나타낸 것이며 고정폐색방식의 신호시스템에서 폐색거리를 고려하면 최소운전시격  $Hs$ 는 식(5)와 같이 주어진다.

$$Hs = 3.6 \times \frac{Ls + \text{폐색거리}}{V_m} + Ts + Ta \quad (5)$$

식(4)와 (5)에서 알 수 있듯이 역구간에서의 운전시격을 줄일 수 있는 변수는 여러 가지가 있지만,

- ① 열차간격  $Ls$ 는 이미 열차의 제동거리와 열차의 속도에 종속되고 열차길이는 4량 편성으로 고정되어 있기 때문에 변경이 불가능하고,
- ② 폐색거리는 역구간의 폐색폐도회로 거리로서 조정이 가능하다.
- ③ 열차의 정차시간  $Ts$ 는 20sec로 고정되어 있어 변경할 수 없고,
- ④  $Ta$ 는 폐색거리에 의해 결정되므로 폐색거리가 결정되면 고정된다.

따라서 고정폐색방식의 신호시스템에서의 최소운전시격은 역구간의 폐색거리를 짧게 분할하므로써 단축시킬 수 있다.

위의 식(5)에서 폐색거리와  $Ta$ 의 값은 정해지지 않았지만 한 편성의 열차길이를 기본폐색거리( $n=1$ )로 생각하고,  $n=1$ 일 때부터  $n$ 을 점차로 증가시키면서 최소운전시격의 변화를 관찰하므로써 1분의 최소운전시격에 적합한 폐색거리를 결정할 수 있다. 그림 2는 폐색거리를 나타내는  $n$ 을 가지고 열차의 속도와 운전시격에 대한 그래프를 나타내고 있다.

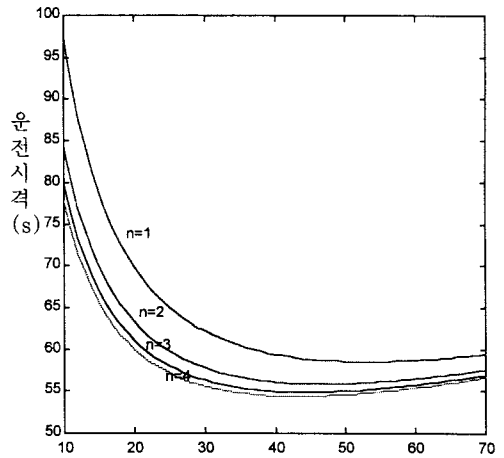


그림 2. 역구간의 폐색수에 따른 최소운전시격

1분의 최소운전시격을 만족하기 위해서는 10%의 여유를 두어 54초의 운전시격을 가져야 한다. 그림2에서 보여주듯이 역 진입속도가 30km/h 이상의 속도를 가질 때 역구간에서 4 폐색을 가지면 적합하다는 것을 알 수 있다. 그렇지만 36.56m의 편성길이를 기본폐색구간으로 설정하였는데, 이는 매우 세밀하게 분할한 것으로 이상과 같이 설비를 할 경우에 많은 시설비가 소요될 것이다.

앞에서도 언급하였듯이 수식적으로는 충분히 최소운전시격을 만족하고 있지만 실질적인 검증을 위해서는 시점 및 종점에서의 회차시격 또한 고려하여야 한다. 따라서 도착역 정차시분, 회차지점까지의 운행시분, 회차지점에서 출발역까지의 운행시분, 출발역 정차시분 등을 감안하여 선로배선 및 차량의 성능과 제원에 의한 TPS를 통하여 최소운전시격을 검토하여야 한다.

## 2.2 운전시격의 TPS에 의한 검토

주어진 노선의 역의 위치와 구배 및 노선조건은 앞에서 주어진 바와 같으며, 이러한 데이터를 이용하여 TPS를 통해 얻어진 두편성의 열차에 대한 운전곡선도를 그림 2에서 보여주고 있다.

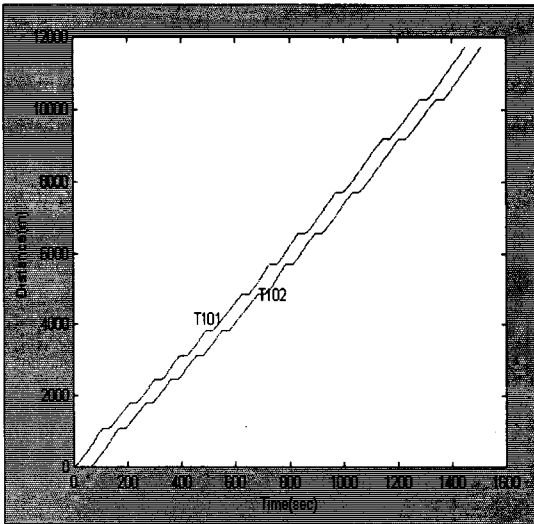


그림 3. TPS에 의한 운전곡선도

각 편성의 열차번호는 선행열차가 T101, 후속열차가 T102이며, 두 편성의 열차는 1분의 운전시격을 가지고 운행되며 역에 정차하는 시간은 20sec로 일정하게 설정하였다. 그림 2의 운전곡선도는 열차주행시간과 거리의 합수로 나타내었으며 동일시간에 대해 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격을 구하고 이러한 열차간격에 대해 그 시간에서의 선행열차와 후속열차의 속도에 의한 열차간격이 안전거리를 넘어서는지 확인하여 열차간격이 안전거리보다 크다면 1분의 최소운전시격은 적합한 값이라고 할 수 있다.

앞 2.1절의 수식적 검토에서 보았듯이 정상운행중에는 역구간에서의 운전시격이 최소운전시격을 결정짓는데 중요한 요소가 될 것이므로 선행열차, 즉 T101이 역으로부터 출발하는 시점에서의 선행열차와 후속열차, T102 사이의 열차간격과 후속열차의 속도에 대한 데이터를 운전곡선도로부터 얻어 표 2에 나타내었다.

표 2에서 보여지듯이 네 번째 역, 즉 ST4에서 선행열차가 발차하는 시점에서 후속열차와의 간격  $L_s$ 가 322.84m로 가장 짧음을 알 수 있다. ST4의 열차간

격 322.84m, 후속열차의 역 진입속도 39.21km/h를 앞 2.1절의 수식적 검토에서 역구간에서의 최소운전시격을 검토할 때 사용하였던 식(4)에 대입하면 최소운전시격  $H_s$ 는 1분의 최소운전시격에 충분히 적합함을 알 수 있다.

또한, 최고속도, 최대구배의 최악의 조건을 가정하였을 때 1분의 최소운전시격을 만족하는 열차간 간격은 312.79m이다. 따라서 1분의 운전시격이 적합함을 알 수 있다.

표 2. 역구간에서의 선행열차와 후속열차간 거리

역 (주행시간)	열차번호	열차위치 (m)	후속열차 속도(km/h)	열차간 거리(m)
ST 1 (130.15s)	T101	1102.84 m	44.55	408.36 m
	T102	694.48 m		
ST 2 (228.9s)	T101	1797.84 m	29	341.84 m
	T102	1456 m		
ST 3 (325.54s)	T101	2479.84 m	36	362.84 m
	T102	2117 m		
ST 4 (428.16s)	T101	3147.84 m	39.21	322.84 m
	T102	2825 m		
ST 5 (513.69s)	T101	3837.84 m	37.53	393.84 m
	T102	3444 m		
ST 6 (649.41s)	T101	4867.84 m	34.28	365.84 m
	T102	4502 m		
ST 7 (751.21s)	T101	5707.84 m	45	420.84 m
	T102	5287 m		
ST 8 (858.2s)	T101	6557.84 m	42.4	357.84 m
	T102	6200 m		
ST 9 (998.38s)	T101	7722.84 m	38.57	354.84 m
	T102	7368 m		
ST 10 (1167s)	T101	9182.84 m	38	367.84 m
	T102	8815 m		
ST 11 (1307.7s)	T101	10282.84 m	32.5	330.84 m
	T102	9952 m		
ST 12 (1473.1s)	T101	11712.84 m	41	360.84 m
	T102	11352 m		

## 3. 결 론

승객의 집중화와 고밀화를 해소하고 열차운행의 효율과 승객서비스의 질을 높이기 위하여 열차의 운전시격을 향상시키는 것이 중요한 요인이 된다. 특히 편성길이가 짧은 경량전철 등의 신교통시스템에서는 보다 중요하게 요구된다. 이를 위하여 본 논문에서는 4량 편성의 짧은 편성길이를 가지는 차량시스템에 대해 1분의 최소운전시격이 적합한지를 수식적 그리고 TPS를 이용하여 검토하였다. 앞에서도 설명하였지만 고정폐색방식의 신호시스템을 적용하였을 경우에는 과도한 시설비가 요구된다. 따라서 이동폐색방식의 신호시스템과 무인운전방식을 적용하는 것이 경량전철 등의 짧은 편성길이를 가지는 신교통시스템에 적합하다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 안태기의, "열차성능시뮬레이터 프로그램 개발", 전기학회 하계학술대회, A권, 1998
- [2] D.C.Gill의, "Computer based optimization techniques for mass transit railway signaling design"
- [3] R.John Hill의, "Modeling Railway Block Signalling Systems Using Discrete-Event Simulation"
- [4] "신호공학", 철도전문대, 1996