

경량전철 시험선 시격에 관한 해석적 고찰

An analytical Review on the Headway of Test Line for Light Rail Transit

정락교* 백종현* 조홍식* 정상기**

Jeong, R.G. Back, J.H. Cho, H.S. Chung, S.G.

ABSTRACT

In order to scheme the optimal assumption that satisfies the travel demand, it should be review the elements that affect on determining the headway, which are signal systems, line shape, vehicle(Light Rail Transit) performance, and so on. When applying the conventional signal systems, including Fixed Block System and Moving Block System, It was confirmed whether or not satisfy the requirements of target line with the way of a numerical formula reviewing and Train performance Simulation on the main line, station, depot, and so forth. Therefore, it should be used as references that decide target line and each sub-system after identifying the compliances for Minimum Headway to Moving Block System.

1. 서론

도시철도의 안전운행을 위하여 가장 기본적인 시스템이며 열차운행과 수송수요에 능동적으로 대처할 수 있는 역할을 담당하는 신호시스템은 매우 중요하므로 최초 신호시스템 선정을 위한 지역 환경조건 및 수송수요, 운전방식등 제반 조건과 더불어 시스템 설정을 위한 검토는 향후 열차운전에 있어서 중요한 결정요인이 된다[1]. 대단위 복합시스템으로 전체시스템이 완성되어야 시험 검증할 수 있는 시스템으로 위험부담이 크므로 기본적으로 초기 설정해야 하는 항목에 대한 면밀한 검토를 수행하여야 시행착오를 줄일 수 있다. 특히 승객 수송수요에 능동적으로 대처할 수 있고 열차의 안전 및 보안도의 향상과 함께 설비의 동작에 대한 페일-세이프(Fail-Safe) 원칙에 의거 신호시스템을 선정하여야 한다[2]. 기존의 궤도회로를 근간으로 한 고정폐색방식과 시격 단축 및 선로변 장치의 감소로 인한 유지보수절감의 이점을 갖고 있는 대안시스템으로 등장한 이동폐색방식으로 대별할 수 있다. 이동폐색방식 구현을 위한 방안으로 무선을 이용한 위치 추적방법이 활발히 연구되고 있다[3].

따라서 본 연구에서는 신호시스템의 분류 및 방식에 대한 개념, 특성에 대한 검토와 더불어 목표노선을 선정하여 열차성능 모의를 토대로 기존의 방식인 고정 폐색방식과 새로운 개념의 이동폐색방식에 대한 최소운전 시격에 대하여 적정성을 검토하였으며 이를 토대로 시험선 건설의 설계기준 및 운영의 기본자료로 활용하고자 한다.

2. 최소 운전 시격의 수식적 검토

2.1 이동폐색방식 적용에 따른 최소 운전 시격

목표노선 구간의 경량전철의 최소 운전 시격을 75[sec]으로 설정하였다. 이는 시간·방향당 수송수요를 16,000여명을 근거로 하였다. 표 3의 목표노선의 열차성능 및 노선조건으로 신호시스템을 이동 폐색 방식을 채택하였을 때 75[sec]의 최소 운전 시격이 적합한지 검토한다. 본선구간과 역부근에 대하여 운전 시격을 수식에 의하여 검토해보고 TPS를 이용하여 얻어진 데이터들을 가지고 두 개 편성의 열차에 대한 운전 곡선도를 작성하고 두 개 편성의 열차간의 거리를 가지고 안전거리와 비교하는 과정을 거쳐 이를 재확인한다.

2.1.1 본선구간의 최소 운전 시격

최소 운전 시격은 본선에서 운행되는 열차간의 최소간격에 의하여 결정되며, 선행열차와 후속열

* 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀 선임연구원, 회원

** 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀 책임연구원, 회원

차 사이의 간격은 실제 제동거리, 제동지령에서 제동시까지의 공주거리와 여유거리의 합산으로 이루어진다. 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격 L_i 는 다음과 같다.

표 1 목표노선의 열차성능 및 노선조건

Table 1 Train performance and line profile of target line

구분	내용	비고
최대 구배	-37.3 %	
최소곡선반경	본선 60 m, 측선 40 m	
최고운행속도	70 km/h 이상	
가속도	3.96 km/h/s	
감속도	4.68 km/h/s	
표정 속도	30 km/h 이상	
차체 길이	9,140 mm (1량 기준)	
운전 시격	75[sec]	
정차 시간	20초	
총 연장	11.7 km	
정차장	13 개소	

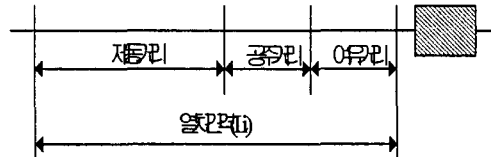


그림 1 열차간 간격 개념도

Fig. 1 Concept of the distance between trains

$$L_i = \frac{V_{\max}^2}{7.2 \times (\beta + \frac{S'}{31})} + \frac{V_{\max}}{3.6} \cdot t \quad (1)$$

+ 여유거리

L_i : 본선구간에서의 열차간격[m]

V_{\max} : 역간 최고속도[km/h] : 70[km/h]

β : 감속도[km/h/s] : 4.68[km/h/s]

S' : 구배상수 최대구배 : -37.3[%]

t : 공주시간[sec] : 3[sec]

그리고 운전시격 H_i 는 다음과 같은 관계식으로 얻을 수 있다.

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

목표노선의 최고속도 V_{\max} 가 70[km/h]이므로, 열차간격 L_i 는 식 (1)에 의해 계산하면 263.22[m]이 됨을 알 수 있다. 따라서 역 중간에서의 운전 시격 H_i 는 식 (2)에서 열차길이는 1편성을 4량으로 산정 하였으며 15.41[sec]가 됨을 알 수 있다.

위의 수식의 결과와 같이 본선구간 운전시의 최소 운전 시격은 최소 15.41[sec]로 계산되었으나, 구배에 따른 영향에 대해서는 고려하였지만 실제운전에 있어서는 이외에도 역간 선로조건에 따른 곡선 및 역간 거리, 역간 속도 등에 따라서 현저하게 달라질 수 있다.

역간 운행에 있어서의 최소 운전 시격은 75[sec] 운행으로 충분하지만 실제운전에 있어서는 역간 거리가 짧아 주행시간이 적고 선행열차의 정차시간으로 인하여 역간 운전에서 최소 운전 시격은 이론상의 결과로 보아야 할 것이다.

2.1.2 역 부근의 최소 운전 시격

역 부근의 최소 운전 시격은 선행열차가 역에 정차한 후, 역을 출발하여 플랫폼 궤도에 진행신호가 현시 되기까지의 후속열차와의 간격을 의미하며, 선행열차가 발차하는 시점에서 후속열차의 간격 L_s 와 이때의 최소 운전 시격 H_s 는 다음과 같다.

$$L_s = \frac{V_{\max}^2}{7.2 \times (\beta + \frac{S'}{31})} + \frac{V_{\max}}{3.6} \cdot t \quad (3)$$

+ 여유거리 + 열차거리

$$H_s = 3.6 \times \frac{L_s}{V_m} + T_s + T_a \quad (4)$$

L_s : 역 부근에서의 열차간격[m]

V_{max} : 운전 최고속도[km/h] : 70[km/h]

β : 감속도[km/h/s] : 4.68[km/h/s]

S' : 구배상수 최대구배 : -37.3[‰]

t : 공주시간 : 3[sec]

V_m : V_{max} 에서 정차하기까지의 평균속도[km/h]

T_s : 정차시간[sec] : 20[sec]

T_a : 발차후 열차의 후미가 출발전로 내방의 과주 구간을 통과해 플랫폼에 진행신호가 현시 되기까지의 시간(이동폐색 방식의 신호시스템에서는 무시할 수 있다.)

선로조건이 최대구배 -37.3[‰]를 고려하고, 앞에서와 같이 속도 V_{max} 는 70[km/h]일 때, 열차간격 L_s 는 식 (3)에 의해 계산하면 299.78[m]이 됨을 알 수 있다. 따라서 역 부분의 운전 시격 H_s 는 식 (4)에서 역에 정차하기까지의 이동 폐색 방식을 사용하므로 $T_a = 0$ 로 볼 수 있으며 평균속도 $V_m = 40$ [km/h]일때, 운전 시격 H_s 가 46.98[sec]로서 75[sec] 운전 시격에 대하여 대략 37.4[%]의 여유를 가지고 있다. 또한 목표 노선의 역 부근에서 최대 -37.3[‰]의 구배를 가지는 역이 있으나 그때 후속열차가 있는 위치에서의 구배는 열차성능모의를 수행하여 획득한 데이터를 바탕으로 하였을 때 -3[‰]의 구배를 가지는 구간에 있기 때문에 역 부근에서의 최소 운전 시격은 여기에서 수식적인 검토에 의한 것보다 훨씬 더 줄어들 수 있다.

2.1.3 열차성능모의에 의한 최소 운전시격

목표노선에 대한 역의 위치와 구배에 대한 데이터는 표2에 나타내어 있으며 이러한 데이터를 이용하여 TPS(Train Performance Simulation)를 실행하여 얻어진 데이터를 가지고 두 편성의 열차에 대한 운전 곡선도를 그림2 에 나타내었다. 각 편성의 열차들에 대한 열차번호는 선행열차가 T101, 후속열차가 T102 이며, 두 편성의 열차는 75[sec]의 운전 시격을 가지고 운행되고 역에 정차하는 시간은 20[sec]로 일정하게 하였다. 그림2의 운전 곡선도는 열차주행시간과 거리의 함수로 나타내었으며 동일시간에 대해 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격을 구하고 이러한 열차간격에 대해 그 시간에서의 선행열차와 후속열차의 속도에 의한 열차간격이 안전거리를 넘어서는지 확인하여 열차간격이 안전거리보다 크다면 75[sec]의 운전 시격은 적합한 값이라고 할 수 있다.

표 2 역의 위치와 구배

Table 2 Location and grade of station

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 ‰

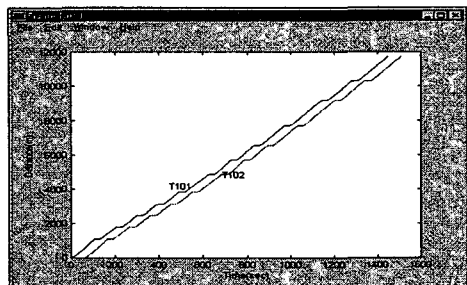


그림 2 TPS 데이터에 의한 운전곡선도
Fig. 2 Operation curve by TPS data

역 부근에서의 최소 운전 시격이 가장 문제가 될 수 있으므로 선행열차, 즉 T101이 역으로부터

출발하는 시점에서의 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격과 후속열차의 속도에 대한 데이터를 이용한 운전곡선도로부터 표 3와 같이 나타낼 수 있다. 역 부근의 최소 운전 시격은 최고속도, 최대구배의 최악의 조건을 가정하였을 때 선행열차와 후속열차 사이의 필요한 열차간격이 299.78[m]이었으며, 표3의 목표노선에서 열차간 거리와 비교해 볼 때 모두가 열차간에 필요한 거리를 넘어서고 있음을 알 수 있다.

표 3 역에서의 선행열차와 후속열차간 거리

Table 3 Distance between preceding and following train in station

역(주행사)	열차 번호	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		

2.2 고정 폐색 방식 적용에 따른 최소 운전 시격

고정 폐색 방식에 의한 신호시스템은 전 세계적으로 주류를 이루고 있는 신호시스템으로서 국내 모든 도시철도 노선에서 사용되고 있으며, 안전성 및 신뢰성이 이미 증명되었다는 장점이 있으나 운전 시격과 궤도회로 장치가 필요하여 유지보수가 필요하다는 단점 또한 가지고 있다. 목표노선에서 이동폐색방식을 적용하였을 때의 최소운전시격과 동일한 조건으로 고정 폐색 방식을 적용하였을 때 목표 시격인 75[sec]의 최소 운전 시격이 적합성을 수식적으로 검토·확인한다.

고정 폐색 방식에 의한 신호시스템을 검토하기 위해서는 우선적으로 제한속도와 폐색 분할에 대한 검토가 선행되어야 한다. 지상의 폐색 장치로부터 구간별 선로의 여건에 따른 제한속도를 차상으로 전송할 수 있는 각 속도코드의 결정은 열차운전에 있어서의 필수적인 사항이다. 속도코드와 폐색분할은 설계를 수행함에 의해 도출되는 사항으로 여기에서는 운전 시격의 적정성을 검토를 위하여 가능한 폐색 길이를 산정하고 이에 의거하여 75[sec]의 최소 운전 시격의 적정성을 대하여 검토를 수행하였다.

본선구간에서 75[sec]이라는 최소 운전 시격은 충분히 만족 가능하므로 생략하고, 역 부근에서 최소 운전 시격에 대하여 중점적으로 검토하도록 하였다.

2.2.1 역 부근 운전 시격의 결정요인

경량전철구간에서는 일반철도 및 지하철 노선구간과는 달리 역간 거리가 짧아 선행열차의 역구내 정차시간에 따라 운전 시격이 크게 좌우되며 선로의 여건에 따른 구배, 곡선, 분기기 등의 제한속도와 폐색구간의 거리 등이 운전 시격의 주요 결정요인이 되고 특히, 역 부근의 최소 운전 시격은 역에 정차중인 선행열차의 정차 시분과 이에 따른 변수에 따라 변화된다.

역 부근의 최소 운전시격은 선행열차가 역에 정차한 후, 역을 출발하여 플랫폼 궤도에 진행신호가 현시 되기까지의 후속열차와의 간격을 의미하며, 선행열차가 발차하는 시점에서 후속열차의 간격 L_s 와 이때의 최소운전시격 H_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = \frac{V_2^2}{7.2 \times \beta} + \frac{V_2}{3.6} \cdot t + \text{여유거리} + \text{열차길이} \quad (5)$$

$$H_s = 3.6 \times \frac{L_s + \text{폐색거리}}{V_m} + T_s + T_a \quad \text{---- (6)}$$

L_s : 역 부근에서의 열차간격[m]

V_2 : 역에 접근하는 열차의 속도[km/h]

β : 감속도[km/h/s] : 4.68[km/h/s]

t : 공주시간 : 3[sec]

V_m : V_2 에서 정차하기까지의 평균속도[km/h]

T_s : 정차시간[sec] : 20[sec]

T_a : 발차 후 열차의 후미가 출발진로 내방의 과주 구간을 통과해 플랫폼에 진행신호가 현시 되기까지의 시간[sec]

위 (5)와 (6) 식에서 알 수 있듯이 역 부근에서의 운전시격을 줄일 수 있는 변수는 여러 가지가 있지만 이들을 살펴보면,

- 1) 열차간격 L_s 는 이미 열차의 제동거리와 열차의 속도에 종속되고 열차길이는 4량 편성으로 고정되어 있기 때문에 변경이 불가능하다.
- 2) 폐색거리는 역 부근의 폐색 궤도화로 거리로서 조정이 가능하다.
- 3) 열차의 정차시간 T_s 는 20[sec]로 고정되어 있다.
- 4) T_a 는 차량의 성능 및 폐색 거리에 의해 결정되므로 폐색거리가 결정되면 고정되어 있다고 볼 수 있다.

따라서 역 부근에서의 운전 시격은 역 부근의 폐색 거리를 짧게 분할하므로써 단축시킬 수 있다.

2.2.2 역 부근의 최소 운전 시격

선행열차와 후속열차 사이의 열차간격 L_s 를 구하기 위하여 식 (5)에서 여유거리를 1량의 차량 길이 및 열차길이는 각각 9.14[m], 36.56[m]로 고정되어 있고, 역에 접근하는 열차의 속도 V_2 는 속도코드의 결정에 의해 단계적인 속도로 나타나지만 여기에서는 10~70[km/h]의 속도로 가정하도록 하면, 식 (5)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L_s = \frac{V_2^2}{7.2 \times 4.68} + \frac{V_2}{3.6} \cdot 3 \quad \text{----- (7)}$$

+ 9.14 + 36.56

식 (6)에서 폐색 거리와 T_a 의 값은 아직 정해지지 않았지만 한 편성의 열차길이는 기본 폐색 거리($n=1$)일 때와 n 을 1씩 증가시키면서 최소 운전 시격의 변화로서 폐색 거리가 결정된다. T_a 는 가속도 3.96 [km/h/s]를 가지고 한 폐색 구간을 통과하는 시간이 될 것이므로 대략 10[sec] 정도로 볼 수 있다. 따라서 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_s = 3.6 \times \frac{L_s + \text{폐색거리}}{V_m} + 20 + 10 \quad \text{----- (8)}$$

주어진 변수들을 가지고 V_2 의 속도와 운전시격에 대한 그래프를 폐색 거리를 나타내는 n 을 가지고 나타내면 그림 3과 같이 보여진다.

목표 노선에서 75[sec]의 최소 운전 시격을 만족하기 위해서는 10[%]의 여유를 두어 67.5[sec]의 운전 시격을 만족하여야 한다. 그림 3에서 보여주듯이 후속열차의 역 진입속도가 15[km/h]이상의 속도를 가질 때 역 부근에서 3 폐색을 가지면 충분히 10[%]의 여유를 가지는 75[sec]의 최소 운전 시격을 만족할 수 있다. 그렇지만 4량 편성의 경량전철에서 한 편성의 열차길이, 즉 36.56[m]을 기본 폐색 거리로 설정하였는데, 이는 매우 작게 분할한 폐색 구간으로 이상과 같이 설비를 할 경우에 시설비가 상당히 높아질 것으로 보이고 최소 운전 시격을 만족하기 위해서는 시점 및 종점역에서의 회차 시격에 관련한 요소들을 고려한다면 어려운 것으로 판단된다.

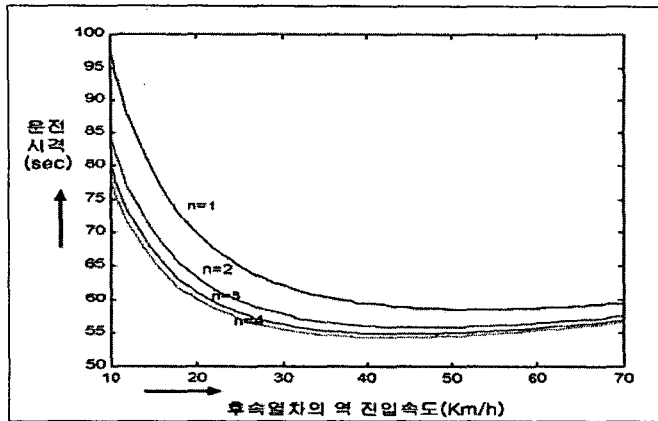


그림 3 역 구내의 폐색수에 따른 최소운전시격
 Fig. 3 Minimum headway as block number of within station

3. 결론 및 향후 과제

일정 동일조건하의 노선 및 차량성능을 전제로 하여 이동폐색방식과 고정폐색방식의 적용시의 최소운전시격의 적합성을 수식적으로 확인하였다. 아울러 목표 시격 설정에 따른 최소운전시격은 이동폐색 및 고정폐색 시스템 적용시의 각각에 대하여 시격에 미치는 영향을 분석하여 이동폐색방식을 적용함이 타당함을 검증·제안하였다. 또한 목표노선에서 이동폐색 방식을 적용시의 적정 차량 간격을 열차성능모의를 수행하여 목표 시격에 적합함을 확인하였다. 역 부분에서 목표시격 75[sec]을 기준으로 동일한 조건으로 보았을 때 이동폐색방식이 30[%]의 효율을 증대됨을 알 수 있으며, 향후의 시험선 건설에 따르는 설계 기준 및 운영을 위한 기본자료로 활용할수 있도록 하여야 한다

참고문헌

[1] 한국철도기술연구원, "부산시 3호선 차량분야 기본설계," pp. 142-171, 1999.
 [2] 한국철도기술연구원, "경량전철신호시스템기술개발," pp. 1-94, 1999
 [3] 정락교, 김영석, "위상차(PDOA)를 이용한 열차 검지," 대한전기학회논문지, 제52권 6호(B권), 2003