경량전철 목표노선의 운전시격 설정에 관한 연구

論 文
53B-1-2

A Study on the Headway Setting of Target Line for Light Rail Transit

鄭 樂 敎* · 金 榮 石**
(Rag-Gyo Jeong · Young-Seok Kim)

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.

Key Words : Minimum Headway(최소운전시격), Light Rail Transit(경량전철), Train Performance Simulation(열차성능모의), Fixed Block System(고정폐색방식), Moving Block System(이동폐색방식)

1. 서 론

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 열차 성능 모의를 토대로 기존의 방식인 고정 폐색방식과 새로운 개념의 이동폐색방식에 대한 최소운전시격에 대하여 적정성을 검토하였다.

* 正 會 員 : 韓國鐵道技術硏究院 先任硏究員
** 正 會 員 : 仁荷大學校 電子·電氣工學部 敎授 工學博士
接受日字 : 2003年 9月 17日
最終完了 : 2003年 11月 10日

2. 신호방식의 분류

동일선로를 운행하는 열차의 충돌 혹은 추돌을 방지하고 안전을 확보하기 위해 신호시스템에 의하여 열차와 열차 사이에는 항상 일정한 간격이 확보되어야 하며, 이를 해결하기 위한 열차의 신호방식에는 일반철도에서 주로 사용하고 있는 지상신호방식과 지하철 및 경량전철 등에서 주로 사용하고 있는 차상신호방식의 2가지 방식이 일반적으로 사용되고 있다.

2.1 지상신호방식

지상신호방식은 폐색경계지점에 신호기를 설치하여 열차의 점유상태에 따라 후속열차의 제한속도를 지령하는 방식으로 후속열차는 매 폐색구간 진입시마다 ATS(Automatic Train Stop)장치에 의해 해당 구간에서의 제한 속도를 수신하게 된다. 한번 수신된 제한속도는 다음 구간에 진입하여 새로운 제한 속도를 수신하기 전까지는 일정하게 유지된다. 이러한 원리로 인하여 속도점제어방식이라 한다. 제한속도를 유지하기 위한 열차의 가속, 감속 및 속도제어는 승무원에 의하여 수동으로 조작되며 제한속도를 준수하지 못하였을 경우 ATS장치에 의하여 비상제동이 동작하여 열차가 정지하게 된다. 이와 같이 열차의 지령속도 수신지점이 지상의 일정지점에 국한되므로 열차간격의 단축에 제약을 받게 되는 단점이 있으므로 일반적으로 저밀도의 장거리선로에 채택되는 방식이라 할 수 있다. 또한 제한속도의 단계는 3현시 또는 4현시, 5현시 등이 사용되고 있다[4].

2.2 차상신호방식

차상신호방식은 폐색구간에 대한 열차의 점유상태에 따라 후속열차의 제한속도를 지령한다는 개념은 지상신호 방식과 동일하나 후속열차는 선행열차가 점유하고 있는 폐색구간과의 상대적인 위치에 따라 차상의 ATC(Automatic Train Control) 장치에 의하여 연속적으로 제한속도를 수신하게 된다는 차이가 있다. 이러한 원리로 인하여 연속속도제어방식이라고도 하며 지상의 위치에 관계없이 열차는 제한속도를 수신할 수 있으므로 열차간 간격의 단축이 보다 용이하며 고밀도의 단거리 선로에 적합한 방식이라 할 수 있다. 차상신호방식은 ATC 단독으로 쓰인 경우는 ATC장치에 의하여 표시되는 차상신호에 의하여 승무원이 가속 또는 감속제어를 행하며 제한속도를 준수하지 못하였을 경우에 한해 ATC장치가 제동을 체결하여 제한속도 이하로 속도를 감속시켜 제한속도 범위에서 열차를 운행할 수 있도록 한다. 또한 ATC/ATO(Automatic Train Operation)장치가 동시에 쓰인 경우는 열차의 속도가 ATC장치의 제한속도에 추종하여, 설정되는 목표속도를 유지하도록 ATO장치에 의하여 가·감속 및 속도제어가 자동으로 이루어지도록 한다[5].

이러한 지상으로부터 제한속도를 전송 받는 차상신호방식은 지상신호방식보다 안전성, 신뢰성 측면에서 뛰어나다는 장점이 있으나 선구의 운전시격이 궤도회로에 의한 폐색구간에 의해 결정되고 궤도회로 장치의 수량이 이동폐색방식(Moving Block System)보다 증가하여 시설비가 늘어나는 단점 또한 내포하고 있다. 이러한 고정폐색방식의 단점을 극복하기 위해 이동폐색방식의 적용을 위한 연구개발이 시도되고 있다. 이동폐색방식은 고정폐색방식의 개념을 초월해 무선신호 전송매체를 이용하여 선행열차의 위치, 속도 등의 신호상태를 후속열차가 지상설비로부터 수신하거나 선행열차로부터 직접 수신하여, 차상에서 직접 열차간격을 조정하므로서 선행열차와의 안전거리를 확보하는 방식이며 가상고정폐색방식(Virtual Fixed Block System)이라고도 한다. 그림 1에서 고정폐색방식과 이동폐색방식의 일반적인 운전곡선도를 보여주고 있다. 고정폐색방식은 선행열차가 점유하고 있는 폐색구간에는 후속열차가 절대 진입할 수 없으므로 폐색구간의 길이에 의해 보다 많은 선행열차와의 안전거리를 유지하여야만 한다. 그러나 이동폐색방식의 경우에는 폐색구간에 제한 받지 않기 때문에 고밀도의 열차운행이 가능하므로 운전시격을 단축시킬 수 있다.

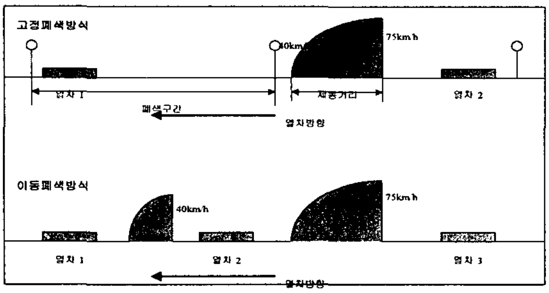

그림 1 이동폐색방식과 고정폐색방식의 운전곡선
Fig. 1 Operation curve of moving block and fixed block system

또한 그림 2의 이동폐색방식과 고정폐색방식의 비용과 성능, 그리고 기술제한에 대해서 그래프로 보여주듯이 추후 이동폐색방식의 기술은 더 발전할 여지가 있으나 고정폐색방식은 현재의 기술이 거의 제한에 이르렀다고 여겨진다.

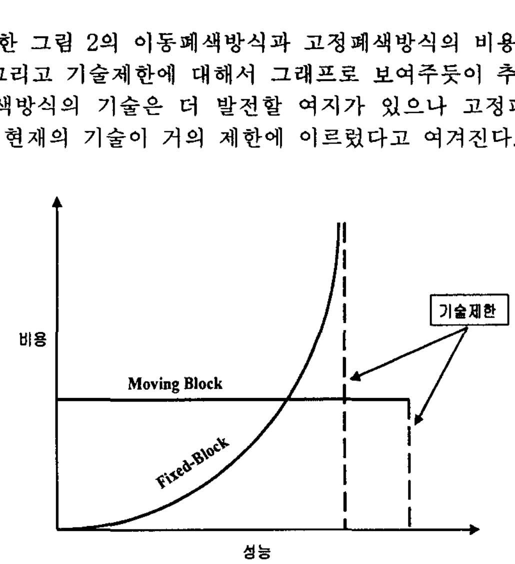

그림 2 이동폐색방식과 고정폐색방식의 비교
Fig. 2 Comparison of moving block and fixed block system

표 1 지상신호방식과 차상신호방식의 특성 비교
Table 1 Comparison of wayside signal and onboard signal system charactistics

내 용	지상신호방식	차상신호방식
신호확인	기상조건, 급곡선, 급구배 등의 선로조건에 의해 신호확인 어려움	차내에 신호가 현시되므로 조건에 관계없이 신호확인이 용이
신호의 다현시화	최대 5현시로 한정되어 있으며, 그 이상의 제한속도에는 현시가 불가능	차상에서 제한속도 및 운행속도를 숫자로 표시하므로서 신호현시의 다변화가 용이
차량제어 방식	가속, 감속 및 제동의 수동제어방식	ATC/ATO설비의 사용으로 각종 제어를 자동으로 수행
신호의 추종성	신호현시 변화에 따른 추종이 늦음	신호현시 변화에 따라 연속제어가 가능
신호의 오인성	수동으로 가감속이 제어되므로 실수에 의한 신호오인현상이 발생가능	ATC/ATO설비에 의하여 자동 가감속제어가 가능하므로 신호 오인발생 가능성이 없음
수송 능률	운행시격을 짧게 할 수 없으므로 수송능률이 낮음	신호의 연속제어에 의해 수송능률이 높음
안전성	신호오인등에 의한 사고위험이 있음	신호오인에 의한 사고의 위험성이 없음
부수설비의 필요성	곡선구간 등에서는 중계신호기 등이 필요	부수신호기가 불필요함
지상신호 설비	신호기와 부속기기 및 케이블 등 설비가 복잡	신호기 관련기기 및 건설공간이 불필요하고 설비가 간단
적합성	운전시격이 길기 때문에 고밀도 운전에 부적합	고밀도 운전에 적합

비용과 성능면으로 보더라도 고정폐색방식의 경우에는 일정 수의 궤도회로를 설치할때까지는 신호시스템의 성능이 향상되나 일정 수의 궤도회로를 넘어서면 비용이 증가하나 성능 향상을 하기는 어렵다. 다만 고정폐색방식은 전 세계적으로 사용실적이 많기 때문에 신뢰성 및 안전성이 입증된 기술이라는 장점이 있다[4, 6].

2.3 이동폐색방식에 의한 신호시스템

2.3.1 이동폐색방식 시스템의 개념 및 구성

이동폐색방식에 의한 신호시스템은 유럽이나 미국, 일본 등과 같은 철도 선진국에서는 CBTC(Communication-Based Train Control)란 이름으로 무선을 이용한 열차제어시스템으로 주로 경량전철 형태의 노선에서 상당부분 운행되고 있거나 계획중이다. 이러한 이동폐색방식에 의한 CBTC 시스템에 대한 개념은 그림 3에 나타내었으며 구성에 대해서는 그림4, 5에 나타내고 있다.

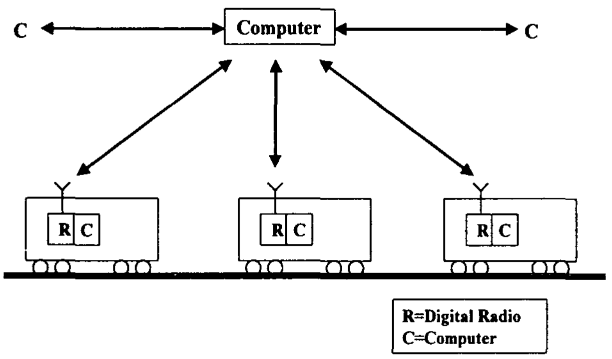

그림 3 CBTC 시스템의 개념
Fig. 3 Concept of CBTC system

이동폐색방식에 의한 신호시스템인 CBTC 시스템은 선행열차의 위치, 속도 및 열차운행에 대한 정보가 지상설비를 통하거나 선행열차로부터 직접 후속열차에 전송되면, 후속열차는 자신의 현재위치 및 속도를 지상으로부터 수신된 정보 및 최대 허용속도와 비교한 후 자신의 최대 주행속도를 실시간적으로 계산한다. 즉 열차 자신의 속도에 따라 선행열차와의 안전거리를 스스로 판단하여 확보한다. 열차간의 안전거리와 운전시격은 선행열차와의 속도차에 의해 좌우되며, 이론적으로 선행열차와 후속열차의 속도가 같다면 열차간의 안전거리는 "0"이 될 수 있다. 이동폐색방식은 고정폐색방식과는 달리 열차간의 거리가 폐색구간의 길이에 의해 제한되지 않기 때문에 정차거리가 감소된다. 따라서 승객의 열차 대기시간 및 열차간의 운전시격이 단축되므로 열차의 편성 수량을 줄일 수 있다. 또한 열차의 폐색구간 점유상태를 검지하기 위해 매 폐색구간마다 궤도회로를 설치할 필요가 없고, 또한 지령을 전송할 필요가 없기 때문에 지상설비의 수가 고정폐색방식에 비해서 감소되는 이점을 가진다. 이를 위해 이동폐색방식은 지상과 차상간에 양방향 통신이 필요하며, 시스템의 안전성을 확보하기 위해 양방향 통신을 위한 지상 및 차상설비는 이중화가 요구되며 모든 열차는 지상의 제어장치와 항상 통신이 이루어져야 한다. 특히 이동폐색방식은 차상 또는 지상 통신설비의 국부적인 고장시에도 전 노선 또는 전 차량에 영향을 미쳐 고장시 대응책이 어렵게 될 우려가 있다. 따라서 이동폐색방식의 신호시스템을 적용하더라도 열차운행의 안전성 및 신뢰성을 확보하기 위해 안전 장치 등의 설치가 필요할 것이다[6].

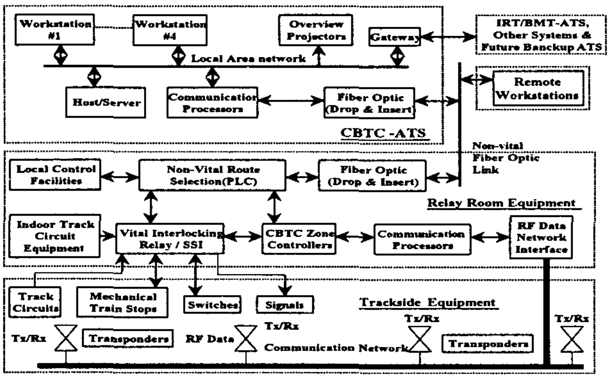

그림 4 CBTC 시스템의 지상설비 구성도
Fig. 4 Configuration for wayside equipment of CBTC system

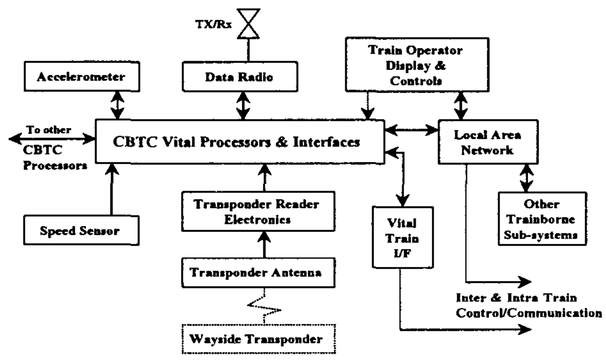

그림 5 CBTC 시스템의 차상설비 구성도
Fig. 5 Onboard configuration for CBTC system

2.3.2 이동폐색방식의 신호시스템 적용 노선

국내의 지하철에서는 아직 이동 폐색방식을 적용한 시스템은 없으며 고정폐색방식에 의한 연속속도제어방식인 ATC 또는 ATC/ATO 시스템을 사용하고 있다. 외국의 경우에는 이동 폐색방식을 적용한 신호시스템을 사용하는 노선이 상당 부분 존재하고 있으며 현재 계획중인 노선과 앞으로의 추이를 지켜볼 때 이동 폐색방식의 신호시스템이 주류를 이루게 될 것으로 보여진다.

표 2에서는 이동폐색방식에 의한 신호시스템을 사용하는 노선들에 대한 최소 운전시격을 포함한 개략적인 정보들을 보여주고 있다[7].

표 2 이동폐색방식의 적용 현황
Table 2 Application status for moving block system

시스템	Van-couver	LondonDLR	Miami	ParisCDG	Debver Airport APM	Newark Airport APM
개통 년도	1986	1987	1986	1996	1995	1995
차량 형태	철제 차륜	철제 차륜	고무 차륜	철제 차륜	철제 차륜	모노 레일
총연장 (km)	28.8	27	7.1	4.3	2.9	3.1
역수	20	35	21	8	7	7
최고속도 (km/h)	90	80		36		43.4
열차 편성(량)	2, 4, 6 cars	2 cars	1, 2 cars	1 cars	2 cars	1, 2 cars
최소운전 시격(s)	90	120	60	21	60	60
수송 능률(명)	25,000	15,600	12,000	5,000	12,000	5,400

3. 최소 운전 시격의 수식적 검토

3.1 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 역 부근에 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.

표 3 목표노선의 열차성능 및 노선조건
Table 3 Train performance and line profile of target line

구 분	내 용	비 고
최대 구배	-37.3 ‰	
최소곡선반경	본선 60 m, 측선 40 m	
최고운행속도	70 km/h 이상	
가 속 도	3.96 km/h/s	
감 속 도	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 연 장	11.7 km	
정 차 장	13 개소	

3.1.1 본선구간의 최소 운전 시격

최소 운전 시격은 본선에서 운행되는 열차간의 최소간격에 의하여 결정되며, 선행열차와 후속열차 사이의 간격은 실제 제동거리, 제동지령에서 제동시까지의 공주거리와 여유거리의 합산으로 이루어진다. 선행열차와 후속열차 사이의 열차간격 Li는 다음과 같다.

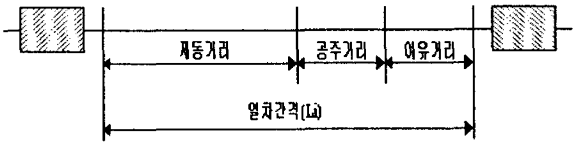

그림 6 열차간 간격 개념도
Fig. 6 Concept of the distance between trains

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

Li : 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 Hi는 다음과 같은 관계식으로 얻을 수 있다.

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

목표노선의 최고속도 V_{max} 가 70[km/h]이므로, 열차간격 Li는 식 (1)에 의해 계산하면 263.22[m]이 됨을 알 수 있다. 따라서 역 중간에서의 운전 시격 Hi는 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 운전에 있어서 최소 운전 시격은 이론상의 결과로 보아야 할 것이다.

3.1.2 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 Ls와 이때의 최소 운전 시격 Hs는 다음과 같다.

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

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

Ls : 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 출발진로 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 Ls는 식 (3)에 의해 계산하면 299.78[m]이 됨을 알 수 있다. 따라서 역 부분의 운전 시격 Hs는 식 (4)에서 역에 정차하기까지의 이동 폐색 방식을 사용하므로 $T_a = 0$ 로 볼 수 있으며 평균 속도 $V_m =$ 40[km/h]일때, 운전 시격 Hs가 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.

3.1.3 열차성능모의에 의한 최소 운전시격

목표노선에 대한 역의 위치와 구배에 대한 데이터는 표4에 나타내어 있으며 이러한 데이터를 이용하여 TPS(Train Performance Simulation)를 실행하여 얻어진 데이터를 가지고 두 편성의 열차에 대한 운전 곡선도를 그림7 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. 그림7의 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 4 역의 위치와 구배
Table 4 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 ‰

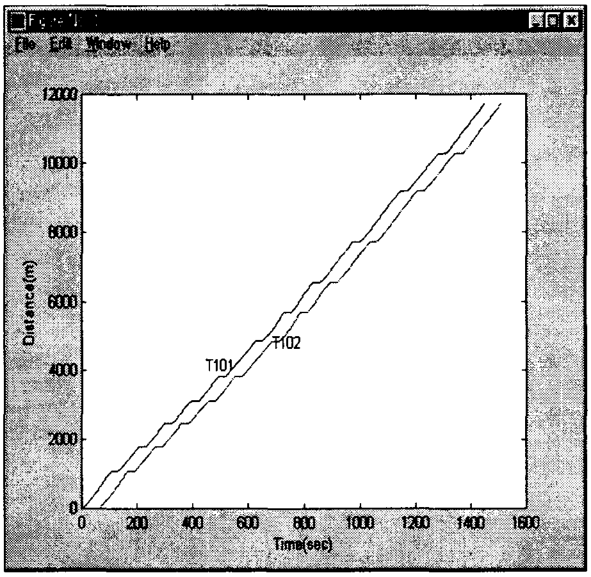

그림 7 TPS 데이터에 의한 운전곡선도
Fig. 7 Operation curve by TPS data

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 5와 같이 나타낼 수 있다.

역 부근의 최소 운전 시격은 최고속도, 최대구배의 최악의 조건을 가정하였을 때 선행열차와 후속열차 사이의 필요한 열차간격이 299.78[m]이었으며, 표5의 목표노선에서 열차간 거리와 비교해 볼 때 모두가 열차간에 필요한 거리를 넘어서고 있음을 알 수 있다

3.2 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・확인을 한다.

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 폐색길이를 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.

3.2.1 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 Ls와 이때의 최소 운전시격 Hs는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

$$Hs = 3.6 \times \frac{Ls + \text{폐색거리}}{V_m} + T_s + T_a \quad (6)$$

Ls : 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 과주구간을 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,

표 5 역에서의 선행열차와 후속열차간 거리

Table 5 Distance between preceding and following train in station

역 (주행시간)	열차번호	열차위치 (m)	후속 열차속도 (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		

1) 열차간격 Ls는 이미 열차의 제동거리와 열차의 속도에 종속되고 열차길이는 4량 편성으로 고정되어 있기 때문에 변경이 불가능하다.

2) 폐색 거리는 역 부근의 폐색 궤도회로 거리로서 조정이 가능하다.

3) 열차의 정차시간 Ts는 20[sec]로 고정되어 있다.

4) Ta는 차량의 성능 및 폐색 거리에 의해 결정되므로 폐색 거리가 결정되면 고정되어 있다고 볼 수 있다.

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

3.2.2 역 부근의 최소 운전 시격

선행열차와 후속열차 사이의 열차간격 Ls를 구하기 위하여 식 (5)에서 여유거리를 1량의 차량길이 및 열차길이는 각각 9.14[m], 36.56[m]로 고정되어 있고, 역에 접근하는 열차의 속도 V2 는 속도코드의 결정에 의해 단계적인 속도로 나타나지만 여기에서는 10~70[km/h]의 속도로 가정하도록 하면, 식 (5)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Ls = \frac{V_2{}^2}{7.2 \times 4.68} + \frac{V_2}{3.6} \cdot 3 + 9.14 + 36.56 \tag{7}$$

식 (6)에서 폐색 거리와 Ta의 값은 아직 정해지지 않았지만 한 편성의 열차길이는 기본 폐색 거리(n=1)일 때와 n을 1씩 증가시키면서 최소 운전 시격의 변화로서 폐색 거리가 결정된다. Ta는 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.

$$Hs = 3.6 \times \frac{Ls + \text{폐색거리}}{V_m} + 20 + 10 \tag{8}$$

주어진 변수들을 가지고 V_2의 속도와 운전시격에 대한 그래프를 폐색 거리를 나타내는 n을 가지고 나타내면 그림 8과 같이 보여진다.

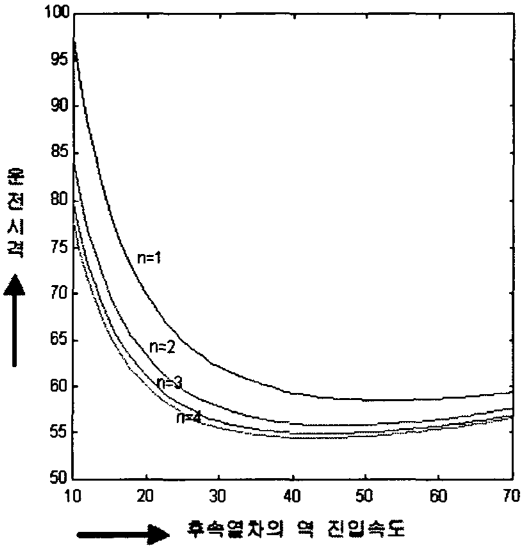

그림 8 역 구내의 폐색수에 따른 최소운전시격

Fig. 8 Minimum headway as block number of within station

목표 노선에서 75[sec]의 최소 운전 시격을 만족하기 위해서는 10[%]의 여유를 두어 67.5[sec]의 운전 시격을 만족하여야 한다. 그림 8에서 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.

3. 결 론

일정 동일조건의 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 열차성능 모의를 수행하여 목표 시격에 적합함을 확인하였다. 역 부분에서 목표시격 75[sec]을 기준으로 동일한 조건으로 보았을 때 열차간의 간격을 이동폐색방식이 30[%]의 효율이 증대됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 건설교통부의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

[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

[4] http//www.tsd.org/Railway Technical Web Pages.

[5] 변유섭외 2인, "열차자동운전에 있어서 미지의 주행저항을 고려한 강인한 속도제어," 대한전기학회논문지, 제50권 3호(D권), 2001

[6] IEEE Standard for "Communications Based Train Control(CBTC) Performance and Functional Requirements", IEEE Std 1474.1, Sep. 1999

[7] L. David Shen, Jian Huang and Fang Zhao, "Automated People Mover Application : A worldwide Review", US Department of Transportation, Dec. 1999.

저 자 소 개

정 락 교 (鄭 樂 敎)

1964년 1월 25일생. 1991년 인하대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사) 1990~1994년 (주) 한진중공업철차사업부. 2003년 현재 한국철도기술연구원 시스템기술개발팀 선임연구원

Tel : 031-460-5725, Fax : 031-460-5749

E-mail : rgjeong@krri.re.kr

김 영 석 (金 榮 石)

1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1989년 전기연구원 전력전자연구실장. 현재 인하대 전자전기공학부 교수.

Tel : 032-860-7397, Fax : 032-863-5822

E-mail : youngsk@inha.ac.kr