

열차의 고밀도운전을 위한 신호보안 시스템에 관한 연구

A Study on the Railway Signal System for High Density Traffic

°강규현*, 김희식**

*철도청 전기국 신호제어과(Tel : +82-2-3149-3747, Fax : +82-2-3149-3749)

**서울시립대학교 전자전기공학부(Tel : +82-2-210-2427, Fax : +82-2-213-8317)

Abstracts In order to shorten head-way time on existing railway lines without any change of signal block length between stations, it is a realistic optional way to change the control method of train signal, i.e. to modernize the cab signal using transponder. A new signalling system of operation pattern control technique is suggested as new model to increase the railway traffic efficiency. Through the computer simulation of this model, the train head-way time by the fixed signalling system and the new pattern control system is analyzed.

Keywords Railway, Head-way, Transponder, Fixed signalling system, Pattern control system

1. 서론

철도교통은 평행직선위를 달리는 선형운동방식으로 정지될 수 있으며 열차운행속도와 제동성능에 따라 선형열차와 후속 열차간의 안전거리를 유지하기 위한 간격 (Braking distance) 이 달라지게 되므로 열차간 간격을 제어하는 방식에 따라 선구를 운행하는 열차횟수 (Traffic Capacity) 가 결정된다.

신호보안시스템은 열차운행을 제어하게 되므로 차량제원과 선로조건을 변경하지 않고 선형열차와 후속열차간의 운행간격을 줄이므로서 열차 운행횟수를 늘일 수 있는 방법을 고찰하였다.

본 논문의 주요 요지는 현행 신호보안시스템에 의한 열차운행 제어 방식의 분석을 통한 새로운 방식을 모델링 하여 운행효과를 분석하고자 하였다.

1.1 연구의 목적

경부축을 중심으로 유동인구는 점점 증가추세에 있으나 대량 교통 수송을 담당하고 있는 열차의 운행빈도는 선로의 조건, 운행열차의 성능, 신호보안장치 등의 제약으로 수송 수요에 미치지 못하고 있는 실정이다. 열차운행 빈도의 제약을 주는 요인을 분석하고 선로 용량을 증대시키기 위한 방안을 모색하므로서 철도 교통 수송력을 강화하기 위한 방법을 찾고자 하였으며, 차량의 제원, 특성, 운행형태를 고려하여 열차운행계획표를 프로그램화 하여 자동으로 작성하여 효율적인 열차운행을 기하고, 열차 운행체계의 가장 중추적인 역할을 수행하는 신호보안장치의 실비현황의 분석과 개선 방향을 검토하므로서 향후 시스템의 방향을 설정하고자 하였다.

표 1 고밀도운전을 위한 신호보안장치 개선방향

TABLE 1 Signaling system improvement for high density traffic

구분	고정폐색신호기 방식	Transponder를 이용한 신호방식으로 개선
운행방식	지상신호	지상/차상신호 겸용
운행밀도	저밀도	고밀도
신호확인	기관사의 육안에 의한	차상의 지시속도 표시
신호전송	열차간격에 따라 신호기등의 색깔 변화	지상의 Transponder를 이용하여 열차에 자동 전송
적용현황	국내 사용중	유럽일부국가에서 사용

1.2 연구방법

본 연구를 위하여 철도청의 열차시각표와 운전계획표(열차다이어그램)를 분석하여 열차운용 실태를 파악하고 운전시각에 영향을 미치는 요소인 신호시스템의 내용을 분석하므로써 기존선의 선로용량의 제한 요소를 도출하고 열차운행 횟수를 증대시킬 수 있는 방안을 고찰하였다.

신호시스템의 가상적인 모델을 설정하여 현재의 시스템으로 열차를 운행하였을 때와 임의로 선정한 가상적인 모델의 신호시스템을 적용하였을 때의 변화를 이론적인 계산에 의한 방법과 실제 프로그램화하여 열차운전계획표를(Train Diagram) 그려보므로서 그 변화 정도를 분석하고자 하였다.

실험을 위한 구간은 경부선 운행선구인 수원 ~ 대전간을 선정하였으며 이 구간은 유동인구와 열차운행 빈도가 가장 높은 곳으로 지하철과는 달리 속도가 서로 다르고 정차역이 열차별로 서로 달라 운전시각을 단축하였을 때 선로용량이 증대되는 효과를 시뮬레이션 하기 위한 알고리즘을 설계하였다.

2. 열차운행에 관한 조사와 운전이론

2.1 열차운행 현황조사

열차운행 현황은 경부선 수원~대전간을 표본화하였으며 이 구간은 열차운행빈도가 가장 높고 경부선을 경유하는 호남, 진라, 장항선의 모든 열차가 운행하는 구간으로서 현재 선로용량은 포화상태이다

2.1.1 열차운행현황

표 2 경부선 수원 ~ 대전간 열차운행 횟수

TABLE 2 Number of trains in Kyong-bu line(Suwon St. ~ Taejon St.)

구간	선로용량	여객					화물			합계
		새마을	무궁화	통일호	비둘기	소계	소화물	화물	소계	
수원~천안 52.7Km	138	32	48	24	2	106	4	28	32	138
천안~조치원 21.9Km	134	30	42	19	2	93	4	34	38	131
조치원~대전 58.9Km	138	30	44	21	2	97	4	33	37	134

표 2는 서울역에서 출발한 모든 열차는 수원역과 천안역을 경유하고 장항선 운행열차는 천안역에서 분기, 조치원~대전 역간에는 충북선을 경유하는 열차가 증가되어 운행된다.

2.1.2 열차등급별 운행현황 [서울~대전간 (166.8Km 31역)]

표 3 서울 ~ 대전간 열차운행 현황

TABLE 3 Train operation between Seoul and Taejon Section

구분	최고속도 (Km/h)	평균속도 (Km/h)	소요시분			정차역수
			운행시분	정차시분	계	
새마을	150	104	96	1	97	1
무궁화	150	99	101	4	105	4
통일호	150	90	111	6	117	6
비둘기	105	51	176	26.5	202	21
화물	105	57	197	0	197	통과

표 3 은 서울~대전간 열차종별 운행속도, 시간 및 역 정차 소요 시분, 정차역수를 철도청 운전시각표('96. 10) 와 열차다이어람 기초로 작성하였다.

2.2 신호설비 현황

2.2.1 신호시스템의 형태와 종류

우리 나라의 철도신호방식은 국철구간에서는 지상신호방식으로 선구에 따라 현시방식을 3현시, 4현시, 5현시를 사용하며 국철구간의 지하철인 과천, 분당, 일산선과 지하철 3, 4호선은 ATC 차상신호방식을 사용하고 있다.

표 4 지상신호현시의 종류 및 제한속도

TABLE 4 Signal aspects and speed restriction

현시별	현시의 종류	속도단계(Km/h)	적용선구
3현시	R,Y,G	정지, 45, Free	단선구간
4현시	R,R1,Y,YG,G	정지, 정지, 45, 65, Free	전동차구간
	R,YY,Y,G	정지, 25, 45, Free	지하철구간
5현시	R,YY,Y,YG,G	정지, 25, 65, 105, Free	경부선(복선)

표 5 ATC구간의 속도단계 및 제한속도표

TABLE 5 Speed step and restriction in ATC

속도단계 (Km/h)	속도코드 (Hz)	비 고
정지	0	일단정지후 15(Km/h)이하 서행
25	5.0	주행시사용
40	6.6	"
60	8.6	"
70	10.8	"
80	13.6	"
Yard(25)	3.2	차량기지에서 사용
Yard Cancel(0)	16.8	기지에서 본선출고시

2.3 폐색방식에 따른 열차운전시각 비교

2.3.1 고정폐색구간의 운전시각

고정폐색구간에서는 열차검지를 위한 궤도회로 즉 폐색구간 길이와 속도변화단계 등이 운전시각에 영향을 미치게 된다.

속도단계 상수 (현시방식) 를 k, 폐색구간 길이를 Lb로 할 때 단계별 속도 Vi (i=1~k)는 다음과 같은 식으로 유도할 수 있다.

$$Lb = \frac{V_m^2}{2\beta \times k} + l_0 + V_m \times t_c \quad (1)$$

$$V_i = V_m \left(\frac{1-(i-1)}{k} \right)^{1/2} \quad (2)$$

Lb : 폐색구간길이(m), Vm : 최고속도(km/h)
 β : 감속도(k/h/s),
 l0 : 열차의 앞부분(前部)과 폐색구간 경계까지의 여유거리(m)
 tc : 제동지연시간(sec), Vi : V1,V2,V3,V4 단계별 속도(km/h)
 i : 속도단계(1 ~ k), A : 현시단계 (3, 4, 5현시)

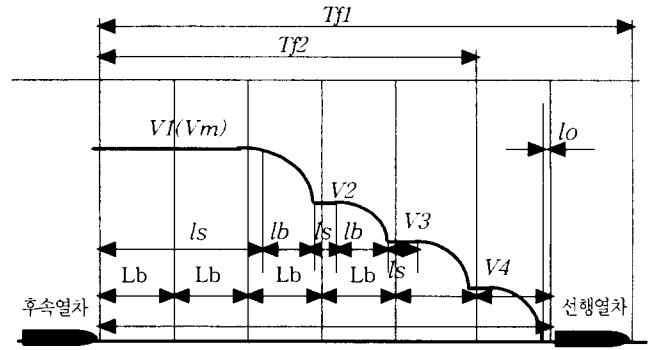


그림 1 5현시 고정폐색구간의 시격 모델링
 Fig. 1 5 Aspect fixed block system modeling

식 (1) 과 (2)를 이용하여 최고속도와 현시단계 및 속도단계를 정하게 되면 폐색신호기의 설치간격을 설정할 수가 있다.

열차의 제동거리는 차량의 주행속도와 제동력에 따라 달라지게 되므로 폐색구간을 설계시에는 그 선구를 운행하는 열차중 열차의 제동거리가 가장 긴 열차를 기준으로 하여야 한다.

열차의 감속도를 1.75 km/h/s라고 가정하면 운행열차의 속도에 따라 다음과 같은 값을 산출할 수가 있다.

표 6 속도, 현시별 폐색구간길이

TABLE 6 Fixed block length on condition of operation speed and signal aspect

구분 최고속도 (km/h)	폐색구간 길이 (m)		
	3현시	4현시	5현시
70	238	206	186
80	286	244	218
100	398	332	292
130	605	494	427
150	770	621	532
200	1,275	1,010	852

현시 단계별 속도 Vi로 주행하는 2 열차의 역간 운전시각 T1 (전체운전시격) 과 T2 (최소안전 운전시격) 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T1 = \frac{(k-i+2)Lb + lc}{Vi} \quad (3)$$

$$T2 = \frac{(k-i)Lb}{Vi} \quad (4)$$

2.3.2 이동폐색구간의 운전시각

열차의 운행상황을 궤도회로에 의하지 않고 G.P.S (Global Positioning System) 또는 C.B.S(Communication Based System) 를 이용하여 실시간으로 열차 위치를 검지하므로써 선형열차의 운행정보를 후속열차에게 전송하여 운전시격을 최소화 할 수 있는 신호방식으로 고정폐색방식과의 비교를 위하여 이동폐색방식을 Modeling 하고 이론적인 수식을 적용하여 운전시격을 비교해 보고자 하였다.

그림2 에서와 같이 임의의 열차에 대하여 상대위치 방식을 이용하여 역간, 통과, 역 정차시의 운전시격을 각각 Tm1, Tm2, Tm3 라고 할 때 각각의 시격은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Tm1 = \frac{V}{2\beta} + \frac{l_0 + lc}{V} + tc + tt \quad (5)$$

$$Tm2 = \frac{V}{2\beta} + tc + tt \quad (6)$$

$$Tm3 = \frac{V}{\beta} + tc + tt + Ta \quad (7)$$

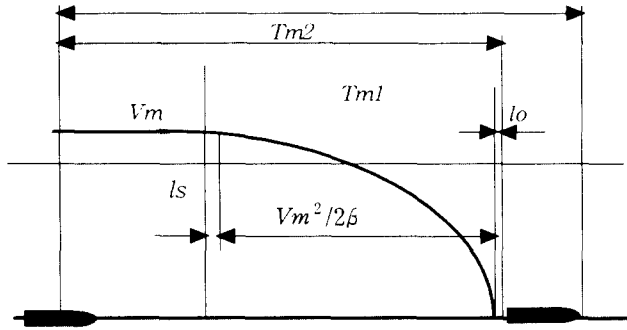


그림 2 이동폐색구간 모델링
Fig. 2 Moving block system modeling

고정폐색 방식에서 적용한 차량제원과 동일한 열차를 이동폐색 방식에 적용하여 운전시각을 계산한 결과는 다음 표와 같다.

표 7 폐색방식에 따른 운전시각 비교
TABLE 7 Head-way of block system

구분 운행속도 (km/h)	운전시각 (sec)					
	고정폐색식(3현시)			이동폐색식		
	Tf1	Tf2	Tf3	Tm1	Tm2	Tm3
150	83	37	153	49	48	131
130	78	34	148	43	42	119
100	89	36	159	35	34	102
70	68	24	138	27	25	85

3. 고밀도운전을 위한 열차운행 Simulation

3.1 신호보안시스템 Modeling

고정폐색 지상신호방식은 이동폐색 차상신호방식에 비해 역간 운전시각이 길어져 운용효율이 저하됨을 알 수 있으며 외국의 지하철 등에서 선로용량을 증대시키기 위해 고정폐색 지상신호 방식에 선행열차의 운행위치를 검지하여 후속열차에 전송하므로 운전시각을 줄여 선로용량을 증대한 예를 참고하여 우리나라 신호방식에 적용 가능한 가상적인 Model을 설계하였다.

3.2 Pattern제어방식의 신호보안시스템

현재의 폐색분할을 그대로 사용하고 궤도회로에 의하여 열차 유무만을 검지 하여 후속열차에게 전송하는 방식으로 시스템 다이아그램은 아래와 같다.

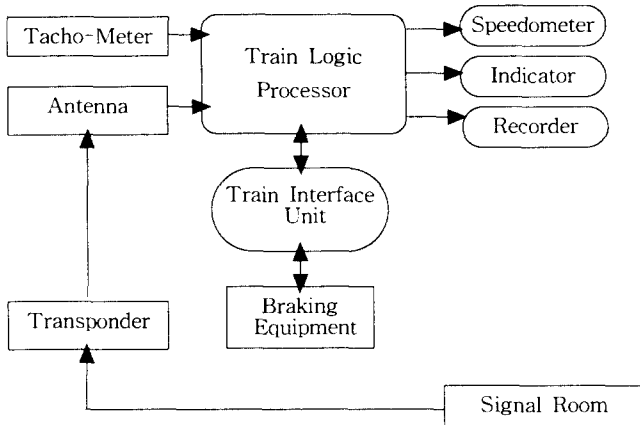


그림 3 시스템 블록도
Fig. 3 System block diagram

3.3 차량의 정보처리 FLOW

Transponder에 의하여 차량으로 보내진 지상정보는 Train Logic Processor에서 열차의 현재속도와 비교하여 차량이 계속 주행할 것인지 제동을 체결할 것인지를 판단하여 계속 주행이 판단되면 차상의 표시판에 주행목표속도를 표시하고 제동이 판단되면 Train Interface Unit를 통하여 감속 목표치 만큼의 제동을 체결하게 된다.

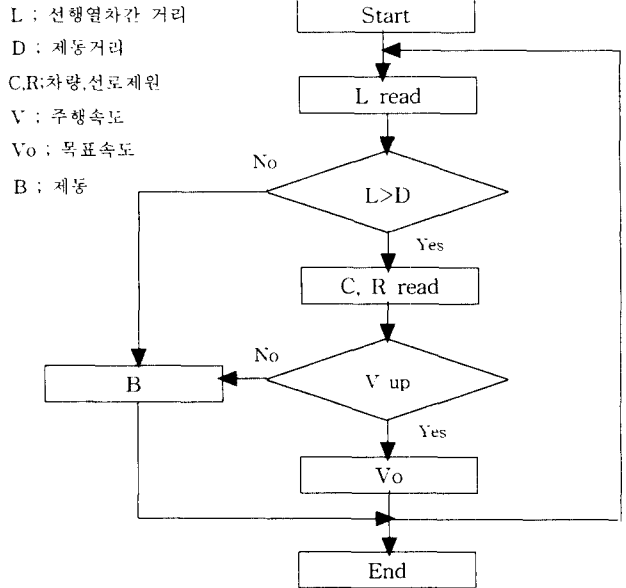


그림 4 시스템의 신호처리 흐름도
Fig. 4 Signal processing flow chart of Pattern Control system

3.4 Pattern제어방식에서의 최소운전시각 계산

신호제어방식을 기존의 고정폐색식 공간분할 방식에서 Pattern 제어방식으로 변경하였을 때의 최소운전시각은 선행열차가 점유한 궤도에서부터 후속열차와의 제동거리만을 확보하고 운행하게 하므로써 신호현시 단계별 속도제어에 비해 시각은 줄어들게 된다.

3.4.1 대피에 소요되는 시간

표 8 대피시 주행거리 및 시간표
TABLE 8 Running distance and time in case of siding

구분	주행속도 (a)	주행거리 (b)	주행속도로 주행		주행속도에서 45km/h감속운행		시간계
			거리 (c=b-e)	시간(d)	거리(e)	시간(f)	
통일호 이상	130 km/h	1,860m	490m	14초	1,370m	56초	70초
비둘기	80 km/h	1,860m	942m	42초	918m	53초	95초

표 9 대피에 요하는 운전시각
TABLE 9 Head-way time in case of siding

구분	case 1 비둘기-통일호	case 2 통일호-통일호	case 3 통일호-비둘기	case 4 비둘기-비둘기
t11	18	18	18	18
t12	53	56	56	53
t13	126	126	126	126
t14	18	18	18	18
t15	67	109	67	109
T1	282	327	285	324

3.4.2 선행열차가 역 정차시 운전시각

표10 선행열차 정차시의 운전시각

TABLE 10 Head-way time in case of preceding train stops at station

구분	case 1 비둘기-통일호	case 2 통일호-통일호	case 3 통일호-비둘기	case 4 비둘기-비둘기
t21	91	70	70	77
t22	67	109	67	109
t23	3	3	3	3
t24	2	2	2	2
T2	163	184	142	191

3.4.3 선행열차 통과시의 운전시각

표11 선행열차 통과시의 운전시각

TABLE 11 Head-way time in case of preceding train goes through station

구분	case 1 비둘기-통일호	case 2 통일호-통일호	case 3 통일호-비둘기	case 4 비둘기-비둘기
t31	17	11	11	17
t32	67	109	67	109
t33	3	3	3	3
t34	2	2	2	2
T3	89	125	83	131

3.4.4 고정패색방식과 Pattern제어방식의 최소운전시각 비교

표12 운전시각 비교표

TABLE 11 Head-way time comparison

구분	case 1 비둘기-통일호		case 2 통일호-통일호		case 3 통일호-비둘기		case 4 비둘기-비둘기	
	현행 시스템	Pattern 제어	현행 시스템	Pattern 제어	현행 시스템	Pattern 제어	현행 시스템	Pattern 제어
T1	476	282	494	327	415	285	555	324
T2	204	168	250	184	183	142	257	191
T3	130	89	191	125	124	83	197	131

※T1 : 대피시, T2 : 선행열차 정차시, T3 : 선행열차 통과시의 최소운전시각(sec)

현재의 신호시스템 방식과 Pattern제어방식에 의한 운전시각 비교결과 시각 단축효과는 운행 형태에 따라 41 ~ 231초 단축된다.

3.5. 열차운행 Simulation system

3.5.1 Algorithm 설계

1. 각 열차별 속성(열차종류, 정차역, 정차시간, 출발역, 종착역)을 테이블화 하고 현재열차시각표에 따라 열차를 배치.
2. 출발역과 도착역 간의 열차다이나를 작성
3. 출발역과 도착역 사이에서 교차가 발생시대피, 또는 통과를 결정(선행열차가 현재열차보다 저등급 열차일때는 대피)
4. 현재열차를 모두 배치하여 다이나를 작성한 후 선로용량의 변화를 알아보기 위해 임의 열차를 임의시각에 출발시킨다.
5. 역정차시간은 새마을30초, 무궁화60초, 통일호60초를 기준
6. 임의 열차의 출발시각에 대하여 출발역과 도착역 사이에서 교차되는 부분이 발생시 후속열차의 출발시각을 조정
7. 열차의 교차가 발생하지 않을 때는 열차종별에 따른 운전시각을 적용하여 후속열차의 출발시각을 정한다.
8. 임의열차에 대한 최초 후속열차가 원래의 출발시각보다 지연된 만큼 다이나 상에서 우측에 배치된 열차다이나를 Shift
9. 최종열차의 도착시간이 00:00이후가 되는 열차는 삭제
10. 열차등급별(새마을, 무궁화, 통일호)로 임의시간대에 출발시켜 선로용량이 포화될 때까지 반복 처리

3.5.2 Simulation System 구성

- H/W : IBM Compatible Pentium 120
- S/W

OS : Windows 95

Programming Tool : Delphi 2.0 (RAD Tool, Boland 사 제작)

Language : Pascal : (Source Program 314KByte, 560 Step)

3.6 Simulation 결과

열차운행시간은 05:30~24:00 (수원역 출발시각 기준) 로 하고 편도열차에 한하여 현재 열차운행횟수(새마을 32회, 무궁화48회, 통일호 24회, 비둘기호 2회)를 최적상태로 재배치한 결과 시간(X)축으로 8시간 03분의 Null Space가 발생
열차군은 최초열차가 무궁화, 그 다음 열차를 새마을, 통일호 순으로 운행하였을 경우 총 96편성 추가운행이 가능

표13 열차운행횟수의 변화

TABLE 13 Increment of traffic

열차종별	운행횟수			비율(%)
	현재	개량시	증가	
계	106	200	96	91
새마을	32	64	32	100
무궁화	48	96	48	100
통일호	24	40	16	67
비둘기	2	-	0	0

화물열차는 야간운행(00:00 ~ 05:30)을 전제로 하였으므로 선로용량에 영향을 미치지 않는 것으로 하였으며, 여객열차인 새마을, 무궁화, 통일호 열차는 출발역과 도착역간의 운행시분을 현재 열차시각표를 사용하였고 비둘기와 같은 저속열차는 3회 이상의 대피가 발생하지 않도록 하였으며, 대전역에서 부산역까지는 선로용량에 어느 정도의 여유가 있으므로 Simulation에서는 대전역 이후에서의 대피는 고려하지 않았다.

*선구의 선로용량은 시간대별 여객수요의 예측에 의한 열차의 운행 Pattern에 따라 변화되므로 실제 용량증가는 Simulation결과와 달라 질 수도 있다.

4. 결론

동일한 조건에서 선구의 선로용량을 높여 고밀도(High Density) 열차운행을 하기 위한 방법으로 신호시스템을 Pattern제어방식으로 변경하여 기존선구인 경부선 수원 ~ 대전간을 모델링 하여 본 결과 운전시각의 단축은 이론적인 도상분석 결과 41 ~ 231초가 단축됨을 알 수 있었으며 운전시각 단축으로 인한 열차운행 횟수는 약 35 % 증가됨을 알 수 있었다.

Simulation System은 신호시스템, 선로제원, 열차속도의 변경 등 열차운행환경 변화시에 선로용량을 계산에 의한 방법이 아닌 실제 열차다이나를 그려보므로 시 총 열차 투입가능 횟수를 알아볼 수 있게 하였으며 앞으로 계속적인 보완을 통해 임시열차의 투입, 상행열차의 지연이 발생할 경우에도 다른 열차의 지연이 발생하지 않도록 탄력적인 대응이 가능하도록 하여 실제 열차운행 제어에 활용할 수 있는 프로그램으로의 보완이 필요하다.

5. 참고문헌

- [1] 철도청, 열차운행계획표, 1996.
- [2] 平尾裕司, 高密度運轉の技術, 電氣情報關聯學會技術, 1990. 2-57 ~ 64
- [3] 철도청, 선로용량 산정, 1991, pp17 ~ 26
- [4] 김의일, 운전이론, 정문사, 1990, pp138 ~ 142
- [5] 철도청, 관구표, 대전지방철도청, 1997
- [6] 大澤 建, 鐵道と電氣技術, ばそこんによる運轉曲線作成しすても, 1996, pp17 ~ 20