

지하철 운전시각 단축을 위한 이동폐색 시뮬레이션

Simulation of the Flexible Moving Blocks System to Shorten Headway of Subway Trains

정동윤 · 김희식

Dong-Yoon Jung · Hee-Sik Kim

Abstract

This paper proposes a simulation method of train control system to increase railroad transportation capacity in the Seoul Subway. Comparing with the conventional fixed blok system, a new train operation method of "moving block system" shows a more capability of same railroad. A graphic simulation program is developed for application of moving blok system to Seoul subway train control system. The result of the simulation program shows a shorten headway i.e. a more dense operation of trains and a higher efficiency of railroad with the suggested moving block system.

1. 서론

지하철 열차는 대량수송 시스템으로 그 수송수요는 급증하고 있어 새로운 운전대책이 요구되고 있다. 즉 지하철의 운전시각의 단축과 조밀한 운전시각에 의한 새로운 열차운전 제어방법이 필요하다. 즉 신호보안 설비의 고기능 시스템에 의한 고속, 고밀도 열차운전을 위한 새로운 운전제어 방식이 필요하다. 기존 열차제어에 사용되는 레일의 궤도회로에서는 초(sec)단위로 이동하는 열차의 정확한 지점을 감지하는 것이 곤란하다. 기차레일은 열차의 동력인 전원을 동기화하여 공급하는 역할과 고정된 폐색구간을 이용한 열차운전을 제어하는 신호설비 역할도 담당하고 있다.

본 연구에서는 운전시각의 단축방안에 관련된 변수를 분석하고, 상황에 따른 운전시각 계산방법을 계산

하는 열차제어 방법인 이동폐색 운전에 대한 시뮬레이션을 연구한다. 이동폐색방식 운전에서는 궤도회로로 구성된 고정폐색방식에 열차 자신이 스스로 운행상황을 판단하여, 폐색구간을 증·감 할 수 있는 새로운 열차제어방식이다. 이동폐색운전 방식은 최소운전시각 단축을 위하여 최근 연구되고 있는 기술이다. 개발한 컴퓨터 시뮬레이션 프로그램은 그래픽 표시방법으로 내용이 한 눈에 확인이 가능하며, 실시간(real time) 운용체제하에서 열차운전 시뮬레이션 실험을 수행한다. 이동폐색방식(Moving Block System)의 운영이 열차간 안전확보 및 동일 레일조건에서 고밀도 열차운전 효율을 목표로 실험한다.

2. 열차운전 신호방식 및 폐색장치

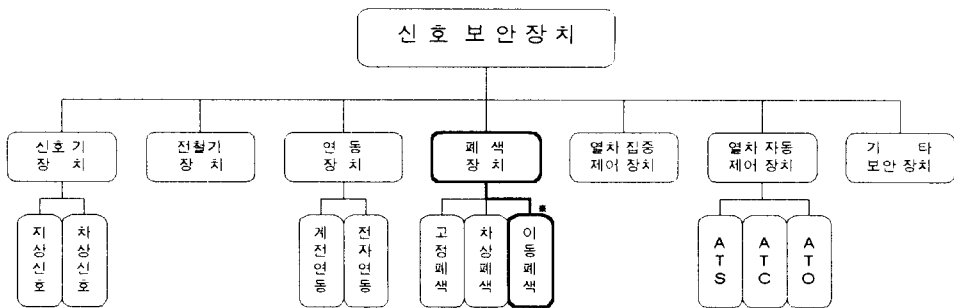
이 배타적으로 운행하도록 하여 충돌 및 사고로부터 열차를 방호해주고 열차간격을 조정하는 설비이다.

2.1. 신호보안장치에 의한 열차운전

열차운전에서 신호보안장치는 선로의 이용율을 최대한 향상시키고, 열차상호간의 안전을 유지하며, 진로를 제어하여 운행차량을 원하는 방향으로 진행하게 하고, 운전취급자의 착오에 의한 사고를 미연에 예방하는 제반시설을 말한다.

(1) 고정폐색방식 (Fixed Block System)

고정폐색방식은 국내 지하철 및 국철에서 널리 사용되고 있는 방식으로써 역간 레일에 대하여 최초 계획된 운전시격에 맞추어 폐색구간을 분할하여 한 구간에 기차 한 대씩만 점유하여 사고 없도록 열차를 운전하는 방법이다. 이 분할된 구간 내에 궤도회로를 설치하



〈그림 1〉 철도 신호보안장치의 분류

즉 열차운전은 반드시 신호보안장치에 의하여 제어되며, 본 연구에서는 그림의 신호보안장치 중 폐색장치의 일부인 이동폐색 방식에 대하여 시물레이션 연구하였다.

여, 해당속도 명령을 궤도회로에 송신하는 방식(AF: Audio Frequency)과 전방폐색구간의 열차점유 또는 무점유 상태에 따라 지정된 계열에 의한 신호현시 패턴으로 수동운전 진행하는 방식이 있다.

2.2 신호방식의 개요

철도신호방식의 선정은 철도신호설비 구축에 있어서 가장 기본적이며 열차운행의 중요한 결정요인이다. 신호방식은 지상신호방식과 차상신호방식으로 대별된다. 지상신호방식은 지상의 전방신호기 현시계열에 따라 운전하는 기존 운행방식이며, 차상신호(cap signal) 방식은 신호 폐턴을 차상으로 직접 데이터 전송되고 컴퓨터 화면에 표시되어 이에 따라 운전하는 첨단방식이다.

(2) 차상폐색방식 (On-Board Block System)

차상폐색방식은 고정폐색방식에서 도출되어온 여러 가지의 단점을 보완하여 개발된, 보다 새로운 설비방식으로써 지상/차상 및 차상/지상으로 데이터를 전송하여 거리 표시기(marker)와 비교 교정하여 열차위치를 차상에서 정확히 컴퓨터에 의해 계산한다.

2.3. 폐색장치(Block System)의 개요

(3) 이동폐색방식 (Moving Block System)

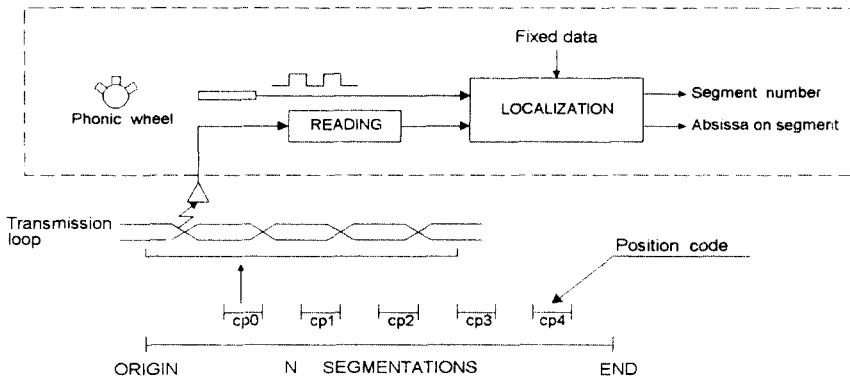
고정폐색구간의 단점을 개선한 방식으로 궤도회로 없이, 선·후행열차 상호간의 위치 및 속도를 무선신호 전송매체에 자동으로 파악되어 운전제어에 활용되는 것이다. 차상에서 직접 열차운행 간격을 조절할 수 있으므로 열차 스스로 이동하면서 자동운전이 이루어지는 완전 컴퓨터화된 폐색방식이다.

폐색장치는 열차선로의 일정구간내에 한 개 열차만

2.4. 이동폐색의 적용원리

(1) 설비의 구성

궤도구간에 유도식 루프코일로 구성된 매트(Mat)를 궤도에 따라 설치하고 차상에는 차상/지상 상호간의 데이터 통신을 위한 송·수신 안테나가 구성되며, 차상에서는 고장시안전 (Fail-Safe) 처리방식을 사용하며 컴퓨터화된 시스템으로 구조는 <그림 2>와 같다.



<그림 2> 이동폐색장치의 신호체계 구성도

(2) 선행열차의 위치 자동검출

신호기기실의 컴퓨터에서는 궤도측의 유도 루프코일로 형성된 매트를 통하여 차상에 전방 신호기 및 전철기의 상태와 열차의 위치 정보를 차상에 송신한다.

회선은 각 열차의 위치가 구간의 원점과 비교되어 결정되는, 작은 구간들로 나누어져 있다. 열차는 구간수에 따라 구간좌표 값에 위치하며 위치측정은 선로변루프의 일련의 교차점에 의한, 위치코드라 불리는 코드기준점에 의해 이루어진다. 이것은 궤도 양측의 간헐적인 전송을 가능하게 한다.

(3) 선구의 제한속도

신호기기실에서는 궤도측으로 고정된 선구의 제한속도인 구배, 곡선 등에 따른 속도정보를 송신하고, 차상에서는 전방 제한속도를 수신한다.

(4) 제한속도와 운행위치의 계산

각 열차의 차상에서는 자체의 위치와 속도를 결정하

고 이들의 데이터를 궤도로부터 수신된 데이터와 비교하고 열차의 가·감속 실행을 계산하여 최대속도를 지시한다.

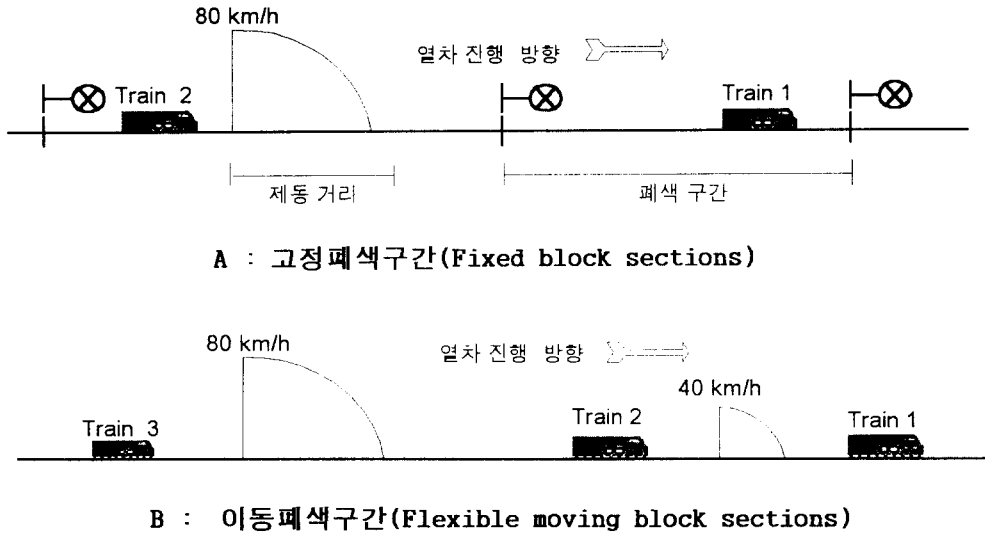
이의 속도는 전방의 각종 조건에 따른 제한속도와 관련하여 안전제동거리를 확보한다.

고정폐색 방식과 이동폐색 방식에 대한 속도 패턴의 비교는 <그림 3>과 같다.

2.5. 이동폐색방식의 향후전망

이동폐색운전은 운전시각의 단축, 열차운전의 자동화, 유지보수의 감소 등 장점이 많은 시스템으로 미국 등 철도선진국에서 이동폐색 운전을 최근 부분적으로 시도하고 있는 단계이다. 폐색구간의 거리 및 열차간의 간격에 대한 제한이 없어 열차의 속도에 대한 제동거리만 확보되면, 열차간의 간격을 줄일 수가 있으므로, 지하철도의 중간 Tunnel에서의 정지거리 감소로 선행열차에 대한 신호정지의 대기시간이 줄어든다.

이동폐색의 장점은 열차의 운행 속도의 향상, 최소 운전시각의 단축, 원활한 열차운전의 향상 등의 이점이 있다. 단점으로는 투자비가 높고 궤도에 루프를 형성하는 매트를 구성하기 때문에, 선로 유지보수에 어려운 점이 따른다. 그러나 지하철도의 대집단 수송에 따른 수송수요의 증가와, 출퇴근시의 열차간 간격을 줄일 수 있는 최소운전시각의 단축을 위하여 향후 서울의 지하철 운영에서도 적용할 것으로 사료된다.



〈그림 3〉 고정과 이동폐색 방식의 속도 패턴

3. 운전시격의 시물레이션 프로그램 개발

폐색제어(Block Control)에 의한 열차운전시격계산 시물레이션 프로그램을 개발하였다. 서울지하철 2호선의 종합운동장 - 교대간을 모델로 선정하여 실제 구간 길이, 폐색구간 및 신호장치 자료를 시물레이션에 이용하였다.

분할되어있는 고정폐색 방식에서는 자동폐색장치 한 구간에 한 열차만 진입하는 조건을 적용하고, 본선구간의 최소운전시격과 역구내부근 및 정차장구내의 최소운전시격 결정요인을 조건변수에 따른 기차운전 규정에 따라 표정속도(Schedule Speed)를 계산하였다.

이동폐색방식에서는 중앙컴퓨터와 차상컴퓨터와의 지속적인 실시간 데이터통신을 가정하였으며, 열차의 속도, 제동거리, 선로의 조건, 선행열차와의 이격거리 등의 데이터를 검지 조합하여 열차의 간격 최소화 및 가·감속 실행을 계산하는 알고리즘을 개발하였다. 시물레이션 비교실험을 하기 위해서 C++ 언어로 코딩하여 실시간 그래픽으로 표시되는 소프트웨어 프로그램을 개발하였다. 펜티엄 PC 시스템에서 이 프로그램을 실행하여 고정 및 이동폐색장치의 운전시격을 비교 분석하였다. 〈그림 4〉와 〈그림 5〉에서 각 시물레이션 실험하는 컬러 그래픽 화면을 보여주고 있다.

3.1. 폐색장치별 열차동작 알고리즘

(1) 고정 폐색장치에서의 열차위치 계산알고리즘

고정폐색방식은 열차의 위치를 분석하는데 있어, 폐색구간의 길이에 의해 제한을 받으며, 열차의 위치를 정밀하게 파악할 수 없다. 또 고정폐색방식에서의 제동은 유연하지 않고 운전규정에 따라 계단식으로 나타난다. 정상운전되는 열차의 경우, 정지를 위해 사전에 감속을 상당한 시간 또는 거리에서부터 조정한다.

즉, 정지를 위한 제동명령이 필요보다 앞서서 도달하게 되어, 정상운행 열차의 제동이 비교적 많게 된다. 이것은 열차의 평균운전속도를 감소시킨다. 〈그림 6〉은 고정폐색 방식에서의 제어형태를 나타내고 있다.

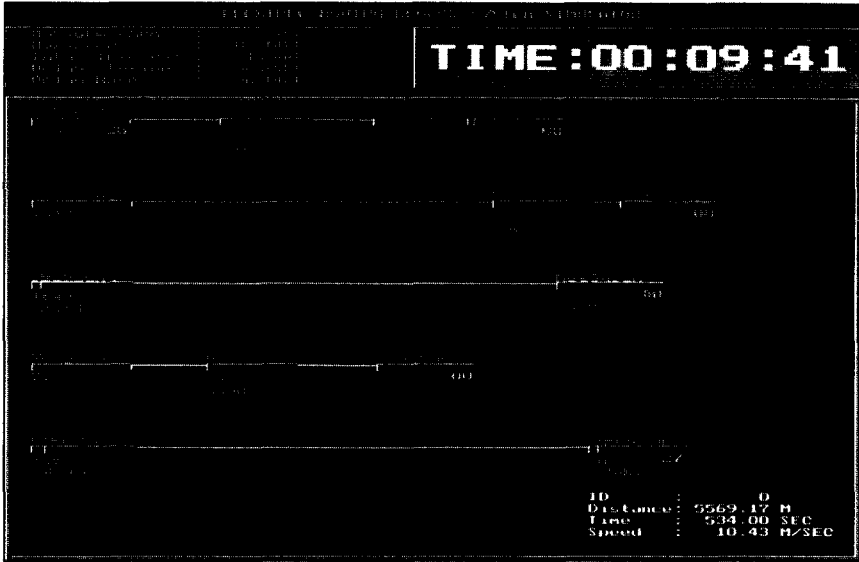
(2) 이동 폐색장치에서의 열차위치 알고리즘

(가) 열차위치 검지 전제조건

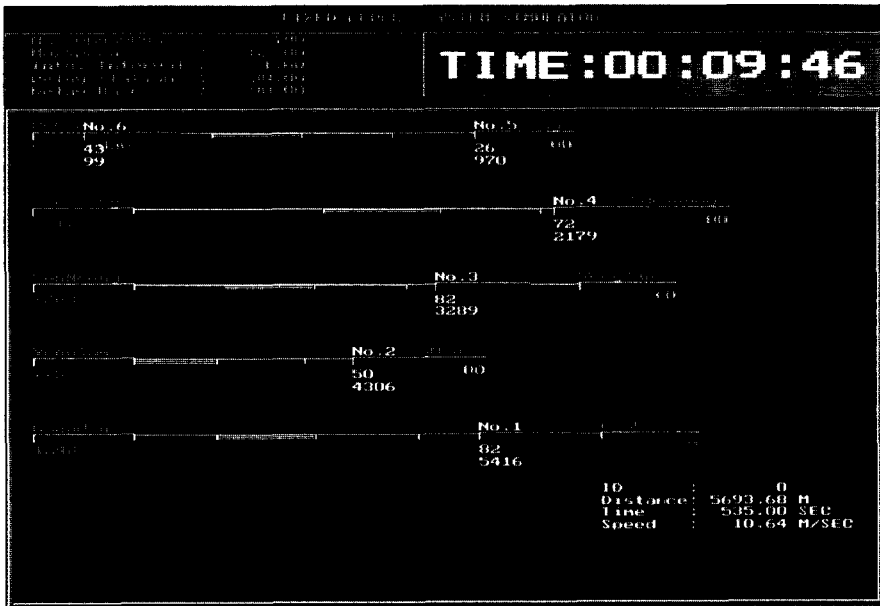
이동폐색방식은 열차의 위치를 정확하고 빠르게, 그리고 빈번하게 파악하여 제동형태를 개선하고, 궤도에 루프코일을 부설하여 센서감지로 제어하는 방식이다. 운행중 열차정보를 검지하는 자기진단 프로그램(Diagnostic program)의 내장으로 각종 데이터 처리와 분석이 가능하다.

(나) Data 전송 알고리즘

최소 운전시격으로 운전되는 선구간에서, 후속열차



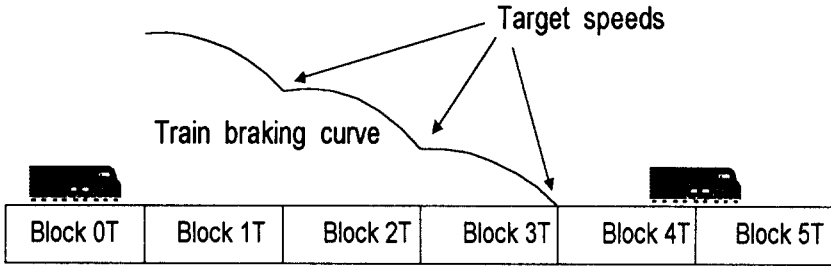
〈그림 4〉 이동폐색 열차운전 시뮬레이션 화면



〈그림 5〉 고정폐색에서 정상운전 시뮬레이션 화면

는 진행에 방해를 받지 않도록 정지 목표위치를 계속 갱신한다. 선형열차의 위치가 지속적으로 이동됨에 따라, 후속 열차의 정지목표위치도 지속적으로 이동되기

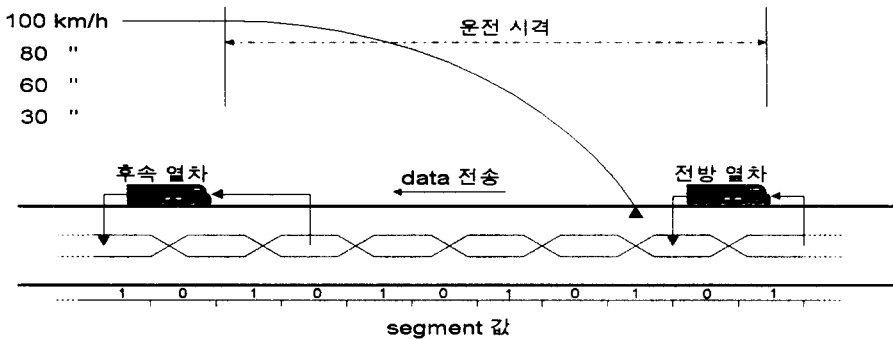
때문이다. 조밀한 열차운전을 위해서는 역 중앙컴퓨터가 빠르고 정확한 차량의 정보를 전송하며, 이것이 열차간격과 속도를 조정 강화할 수 있어 전체적인 열차



〈그림 6〉 고정폐색에서 열차의 구간 점유와 대응되는 열차속도

의 속도를 최적화 한다. 다수 열차간의 동적 상호작용을 조정강화시켜 수송시스템의 성능을 향상시킬 수 있다.

열차 안전운행의 규정조건에 의한 관계식은 아래와 같다.



〈그림 7〉 이동폐색방식에서 열차제어 구조

(다) 선·후행 열차와의 관계 조건

① 선행열차 : 궤도회로장 한 개는 센서의 1개 길이가 점에서 수m정도이며 이를 계수하여, 자신의 위치와 속도 데이터를 송신하여 후속열차가 활용한다.

② 후속열차 : 선행열차의 위치·속도를 정보수신하며, 구간계수로 안전 제동거리를 확보하여 속도를 조절한다.

$$LX = L_1 + L_2 + L_3 \quad [M]$$

$$L_1 = \frac{V_{MAX}}{3.6} \times t \quad [M]$$

$$L_2 = \frac{V_{MAX}^2}{7.2 \beta} \quad [M]$$

$$L_3 = 20 \quad [M]$$

$$HW = 3.6 \times \frac{LX + \text{열차장}}{V_n} \quad [SEC]$$

LX : 제동거리 [M] V_n : 역간열차속도 [km/h]

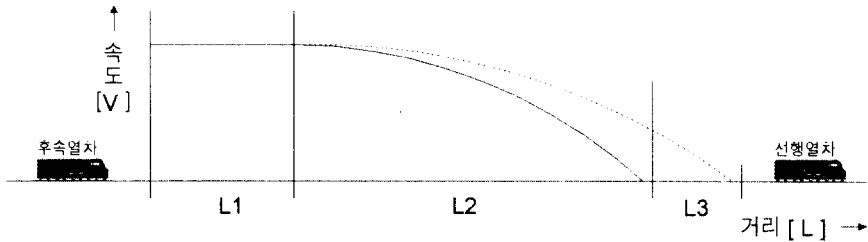
L_1 : 空走거리 [M] β : 상용감속도 [3.5 km/h/s]

L_2 : 실제동거리 [M] V_{MAX} : 역간 열차최고속도 [82km/h]

L_3 : 여유거리 [M] t : 空走時分 [SEC]

(3) 프로그램에 적용된 최소운전시격의 계산

최소 운전시격은 본선에 운행하는 열차간의 최소간격에 의하여 결정되며, 선행열차와 후속열차간의 간격은 후속열차의 실 제동거리, 제동초기 정보에서 말단 제동시 까지의 거리는 시간에 대한 거리인 공주거리와 여유거리의 합산으로 관계식으로 계산된다.



〈그림 8〉 선·후행 열차간 거리조건에 의한 최소운전시각 계산원리

HW : 최소운전시각 [SEC]

4. 시뮬레이션 실험 및 결과고찰

4.1. 시뮬레이션 실험대상 선정

이동폐색의 운전시각 프로그램은, 〈그림 9〉에서와 같이 고정폐색 방식의 지하철 2호선 실제구간을 대상 모델역으로 선정하였다. 이 구간은 폐색구간과 신호설비가 다양하여 대표적 시뮬레이션 실험대상 구간으로 적합하다. 위 두 종류의 실험모듈에 각 조건들의 값을 인위적으로 변화시킨 후, 실시간(real time) 방식으로 열차를 운행하는 시뮬레이션 실험을 하였다.

본 논문의 프로그램은 이동폐색장치에 관한 운전시각단축의 결과를 얻기 위해서 개발하였다. 기존의 고정폐색장치는 이미 운전시각의 한계조건이 있으므로 단지 비교하기 위한 대상의 값으로 정하였다. 또한 컴퓨터는 자기 진단프로그램이 완전한 기능을 한다는 가정하에서, 폐색방식조건에 따른 운전시각 단축 가능성을 실험했다.

4.2. 시뮬레이션 시스템 내용

고정폐색과 이동폐색에서의 시뮬레이션 실험의 전체적인 시스템 흐름도는 다음 그림과 같다. 주요부는 크게 3등분하여 (1)초기화(Initialize), (2)본 실험(Process), (3)종결(Close) 단계로 나눈다. 초기화와 종결단계는 화면의 그래픽 표시 조건을 지정하고 주요변수를 저장하는 모듈이다.

Procees_Quit 이라는 변수를 사용하여 무한 반복 계

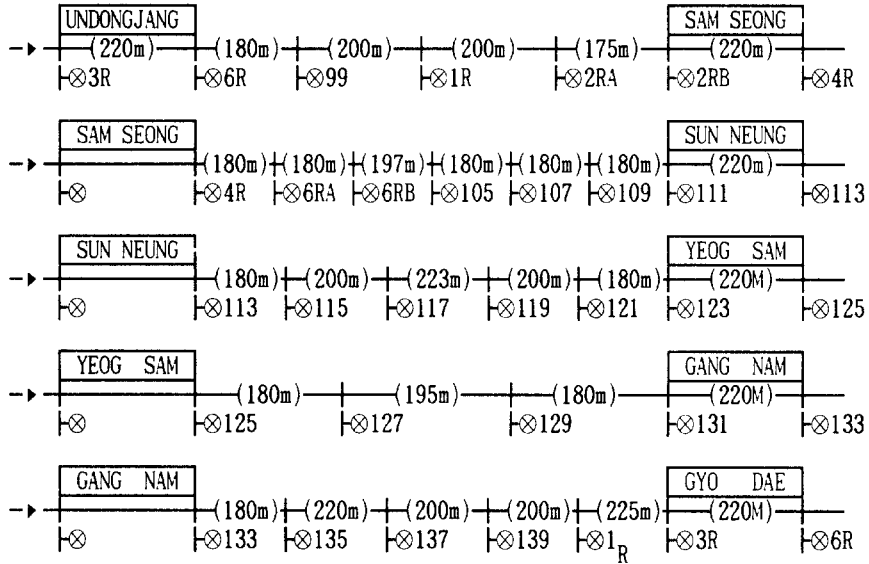
산의 탈출 조건을 지정하였다. 출발 기차의 총 숫자 또는 도중정지 조건을 인식하여 끝낸다. 흐름의 종결 시에 MakeRecordFile 모듈은 실험 결과를 화면에 표시하고 파일에도 저장한다. ProcessBaseStrat는 출발역의 조건, ProcessSubway는 운전 기차의 속도와 열차간 안전거리 등 조건을 제어한다. DrawRoute는 역과 선로의 그림을 계속 화면에 표시하고, DrawSubway는 이동중인 기차를 선로상에 실시간으로 표시한다. ProcBaseEnd는 구간의 최종역의 조건을 제어하고 열차의 도착 시간과 간격 등을 계산한다. 시뮬레이션 종료는 운전할 열차의 총합계 숫자를 지정하거나, 결과의 변화를 관찰하고 도중에도 키를 입력하여 결과 데이터를 저장하고 종료할 수 있도록 하였다.

4.3. 고정 및 이동폐색 방식에서 주행결과

〈그림 10〉은 열차별 운행구역과 시간이 경과됨에 따라 이동방식이 고정방식보다 점진적으로 빠른 시간차를 보인다. 〈표 2〉는 종착역 도착시 소요된 각 열차시간(초)을 나타낸다.

① 〈표 2〉의 각 열차간격 차이(Difference)에서 104초 및 79초를 기준으로 하기까지는 종착역(교대) 도착시, 열차간격 차이를 30초에서 120초 사이에 다양하게 시뮬레이션 실험을 통한 다른 여러 결과들과 비교 측정한 값이다. 따라서 이 시각부터가 최초역 출발의 열차 지연이 발생되지 않는 시간대 즉, 최소운전시각임을 확인하였다.

② 고정폐색때의 값 104초와, 이동폐색때의 값 79초와의 차이는 열차진행 시각이 지남에 따라 더욱 큰 격차가 발생하여, 고정폐색에서의 열차지연이 그 만큼 증



〈그림 9〉 시물레이션 대상 역 및 실제 폐색구간 길이

〈표 1〉 시물레이션 대상 역, 폐색구간 거리 및 수량

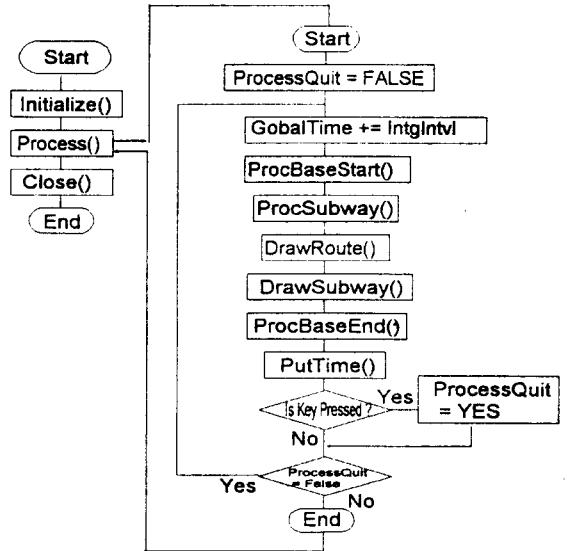
구 분	시물레이션 대상 역구간		
	구 간 명	구간거리[M]	폐색수량[개소]
1 구간	운동장 — 삼성	975	5
2 구간	삼 성 — 선릉	1,317	7
3 구간	선릉 — 역삼	1,203	6
4 구간	역삼 — 강남	775	4
5 구간	강남 — 교대	1,245	6
총구간		5,515	28

가됨을 보였다.

③ 여기서의 이동방식은 고정방식과 같은 운행조건으로 비교실험을 하였을 때, 열차운전시격 단축에서 약 24%의 향상을 보였다.

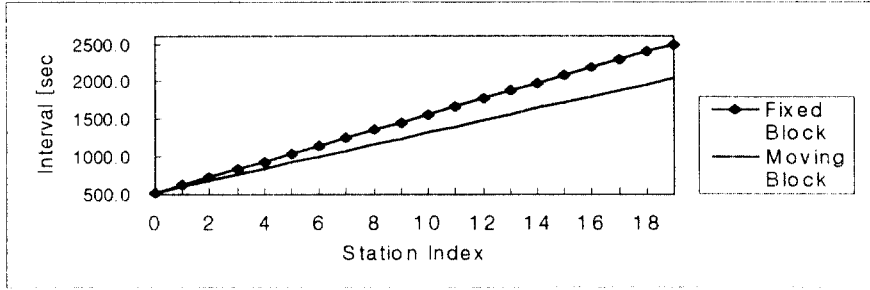
④ 이동폐색방식을 Simulation 방법으로 실제적인 지하철 노선에 적용하여 본 바, 이 시스템을 확장하여 서울 지하철 및 도시철도에 도입, 열차운전시격 단축가능을 정밀하게 보여 주었다.

⑤ 전체 지하철구간에 대한 열차운행의 정밀 시물레이션 실험을 위해서는 철도열차운전의 각 부분 시스템과 관련되어 있는 구간의 현장조건, 곡선이나 분기



〈그림 10〉 전체 시물레이션 흐름도

기 신호시스템, 전력시스템 등의 조건 적용이 필요하다.



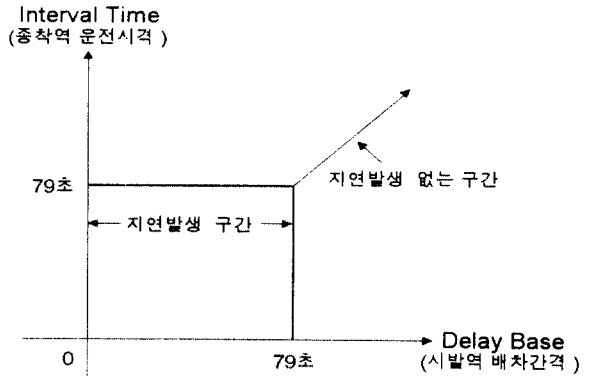
〈그림 11〉 고정과 이동의 운전시각 시뮬레이션 비교 실험결과

〈표 2〉 고정과 이동의 운전시각 비교표(104초 및 79초 기준적용)

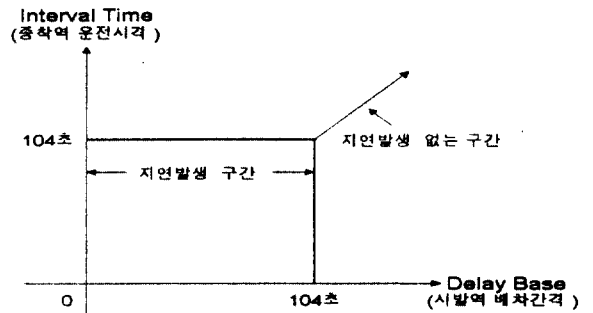
(단위 : 초)

열차연속번호	고정폐색 열차출발시간	이동폐색 열차출발시간	대비율(%)
(기본운전시각)	104.0	79.0	76.0
0번 열차	522.5	526.5	100.7
1 "	626.5	606.0	96.7
2 "	730.5	685.0	93.8
3 "	834.5	765.5	91.7
4 "	938.5	845.5	90.0
5 "	1042.5	924.5	88.7
6 "	1146.5	1004.5	87.6
7 "	1250.5	1083.0	86.7
8 "	1354.5	1163.0	85.9
9 "	1458.5	1243.0	85.2
10 "	1562.5	1321.5	84.6
11 "	1666.5	1401.0	84.0
12 "	1770.5	1481.5	84.0
13 "	1874.5	1560.5	83.2
14 "	1978.5	1640.0	82.9
15 "	2082.5	1720.5	82.6
16 "	2186.5	1799.0	82.3
17 "	2290.5	1878.0	82.0
18 "	2394.5	1958.5	81.8
19 "	2498.5	2037.5	81.5

Total 운전시각 시뮬레이션 실험결과는 〈그림 11〉, 〈그림 12〉와 같고, 각각 79초와 104초 시점에서 열차지연이 없는 운전이 가능하다. 즉 이동폐색이 고정폐색에 비하여 운전시각 25초간의 차이의 단축 향상이 있었다.



〈그림 12〉 이동폐색 운전의 정상상태 도달시 실험결과



〈그림 13〉 고정폐색 운전의 정상상태 도달시 실험결과

4.4 정상상태 도달시 운전시각 시뮬레이션 실험결과

열차정상운전을 하기 위한 고정폐색과 이동폐색의

5. 결론

본 논문에서는 이동폐색 시스템의 운전시각 단축을 목적으로, 기존 철도시스템을 분석하고, 고정폐색장치에 열차 스스로 간격을 조절하면서 운행하는, 운전조건 알고리즘을 개발 적용하여 실시간 방식으로 컴퓨터 시물레이션 실험을 하였다. 열차운행의 세부적 변수의 모든 조건을 시물레이션에 적용하기는 매우 방대하므로, 전제조건은 이동폐색 시스템적용의 기본적 열차제어과정에 대하여 그래픽 시물레이션 시스템을 개발하여 다양한 조건에서 실험을 수행하였다.

열차지연이 발생되지 않는 최소운전시각을 얻기 위하여 여러 조건들을 비교 실험한 결과 이동폐색 시스템에서의 효율적 운행이 보여졌다. 시물레이션에서는 고정폐색에서 열차가 진입하지 못하는 구간을 이동폐색에서는 좀 더 진입이 허용되는 조건과 열차 운전 가감속 기본이론을 적용하여 최소간격을 계산하였다. 시물레이션 실험결과에서 열차지연이 발생되지 않는 최소운전시각은 이동폐색에서 79초, 고정폐색에서 104초를 나타내어, 이동폐색 운행시에 운전시각이 단축되고, 레일의 운행효율이 향상되었다.

실제 운전조건에 대한 계산을 위하여 역간 선로조건에 따른 곡선, 구배, 역간거리, 속도, 역정차시분 및 차량의 특성변수등을 개발한 시물레이션 프로그램에 보완하면 더욱 실제적이고 정밀한 운전시각 단축의 결과가 예측된다. 즉 이동폐색을 이용함으로써 평균 열차운행속도 향상과 최소운전시각의 단축 기능을 정량적으로 확인하였다.

최근 철도안전보안장치에서는 자동운전 즉 무인운전 방향으로 발전하고 있는 변화추세이며, 서울지하철에서도 자동운전과 운전시각단축을 위하여 이동폐색 시

스템의 적용이 필요하다. 지하철도의 현장 선로조건외 복잡한 입력조건을 고려하여 본 시물레이션 프로그램을 추후 보완하면 지하철의 각 호선별 운전에 대하여 정밀하게 분석할 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 이기서, 유광근, "무선통신·컴퓨터기술을 결합한 Advanced Automatic Train Control", 한국철도 신호 기술협회, VOL.20 NO.20, 1994.
- [2] 이재훈, "전자 연동 장치의 전철제어 논리에 관한 연구", 광운대학교, 산업정보 대학원 석사학위 논문, 1994.
- [3] "고속전철 기술현황 제2호", 기술조사보고(대한전기학회, July, 1992.)
- [4] 서울지하철 5호선 기본 설계보고서(서울지하철 건설본부, Aug. 1990)
- [5] 전자 연동 장치 I, II, III(서울시 도시철도공사, 1995)
- [6] 대전도시철도 1호선 기본 설계 보고서II(대전지하철기획단, Oct. 1995)
- [7] "신호공학"(사단법인 일본철도 전기기술협회, Sept. 1983)
- [8] 秋田雄志, 中村英夫, "철도신호제어フェールオーバーシステム", 전자정보보학회지(日), VOL. 73 NO.11, 1990.11, pp.1203~1207.
- [9] *Flexible Moving Blocks System* (Ref GEC ALSTHOM, Jan. 1990)
- [10] "Wayside Signalling Description", Seoul Subway Line 5 System IV Signalling System (UNION SWITCH & SIGNAL) SM6575-1, July, 1994

● 저자소개 ●



정동운

1988년 서울산업대학교 전기공학학과 학사
 1996년 서울시립대학교 산업대학원 공학석사
 1981~1983년 생산기술연구원
 1984년~현재 서울지하철공사 신호통신부



김희식

1977년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1979년 한국과학원 생산공학과 석사
 1987년 독일 Stuttgart 대학교 공학박사
 1987~1989년 한국과학기술원 선임연구원
 1989년~현재 서울시립대학교 제어계측공학과 부교수