

이동 폐색구간 열차시스템에서 이동권한 설정 알고리즘

*김 승용, *이 창구, **김 용규, **백 종현
*전북대학교 제어 계측 공학과, **한국 철도 기술 연구회

Movement authority setting algorithm for Moving Block System

Seung-yong Kim*, Chang-goo Lee*, Yong-gyu Kim**, Jong-hyun Beak**

*Department of Control and Instrumental Engineering, Chonbuk National University, **Train Control Research Group, KRRI

Abstract - Now a day, the Korean National Railroad is taking new agewith the opening of KTX (Korea Train Express). Korean National Railroad is planning using the GSM-r for put KTX and existing equipment to a good. GSM-R is radio communication method selected by ERTMS (European Rail Traffic Management System). So a new algorithm for train movement is necessary to radio communication form. This paper is come up with an algorithm for like that situation.

Keywords: Train, Algorithm for GSM-r, Radio communication.

1. 서 론

현재 한국철도는 고정폐색구간을 이용한 열차 운행이 아닌 이동폐색구간개념을 적용하기 위해 새로운 통신기반 열차 제어 시스템(ERTMS의 GSM-R)을 준비하고 있다. 한국철도가 운행효율성 증가를 목적으로 CBTC를 적용하였을 때 발생할 수 있는 안전성 문제에 대해 이를 해결할 수 있는 새로운 알고리즘이 요구된다. 본 연구는 그러한 알고리즘을 제시하고 그 내용은 다음과 같다. 차량이 선로를 따라 운행 할 때 안전 운행에 필요한 데이터들이 차상장치에 의해 받아들여지며 통신기반 열차 제어 시스템에서 차상 장치는 노선에서 운행되는 모든 열차에 설치되어 있게 되며 차상장치에 의해 받아들여진 정보를 해석하여 최적의 운행 계획을 수립 하게 된다. 운행 계획을 수립함에 있어 가장 중요한 것은 안전이며 또한 승객의 승차감이다. 따라서 본지에서는 안전하게 계획대로 운행되도록 하기 위한 알고리즘을 제시하는 것을 목표로 하고 운행을 하는 시뮬레이션을 하였다. 2절에서 알고리즘 설정 과정을 설명하였고 3절에서 시뮬레이션 과정 및 알고리즘대로 시뮬레이션 하였을 때의 결과를 보였다. 본 연구가 제시하는 알고리즘의 주요내용은 목표속도로 안전이 보장되는 위치에 승차감을 고려한 운행속도 프로파일대로 이동하는 것이다.

2. 이동권한 설정 알고리즘

전반적인 시스템의 흐름도는 Fig.1 과 같이 구성하였다.

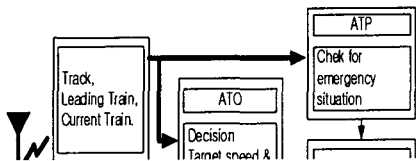


Fig. 1 Movement authority setting flow chart.

Fig.1의 구성에 따라 2.1절에서 열차가 가져야 할 최적의 가속 형태에 대해 소개 하고 2.2절에서 이동권한 레벨을 설정하는 타당한 식에 대해 말한다. 2.1절과 2.2절의 내용을 토대로 2.4절에서 이동권한설정 알고리즘을 제시하였다.

2.1 열차의 가속 형태

기차는 승객의 승차감과 승객의 안전이 가장 중요하다고 할 수 있다. 그러므로 열차는 승객이 저크를 느끼지 못하는 범위 내에서 가속 및 감속을 하여야 한다. 따라서 어떤 목표 속도가 정해 졌을 때 그 목표 속도까지 진행하기 위해 다음과 같은 속도 프로필을 가져야 한다.

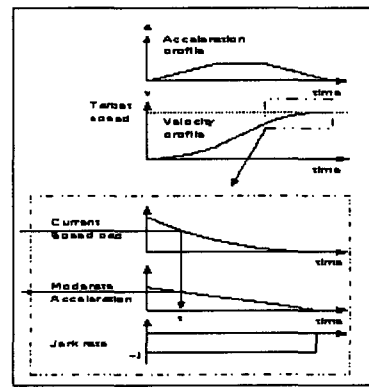


Fig. 2 속도 차이에 따라 가속도 계산

문제는 최고 가속도까지 도달하는 것이 아니라 감속을 해야 하는 타이밍이라고 할 수 있다. 다음의 식을 통해 그 타이밍을 결정한다.

$$\begin{aligned}
 j_{erk\ rate} &= j_{erk} \quad (\text{Constant value}) \\
 a &= j_{erk} \times t + c_1 \quad \text{---(1)} \\
 v &= \frac{1}{2} j_{erk} \times t^2 + c_1 t + c_2 \quad \text{---(2)} \\
 & \quad (a = \text{acceleration}, v = \text{velocity}) \\
 t &= \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 2j_{erk}(c_2 - v)}}{j_{erk}} \quad \text{---(3)}
 \end{aligned}$$

(3)식의 두 해중 양의 값만을 선택한다. Fig.2의 속도 그래프와 같이 동작하기 위해 목표 속도와 진행 중인 열차의 현재속도와와의 차이를 입력으로 한다. 이 속도차이가 제로가 될 때까지의 시간 t를 구한다. 속도에 관한 식은 시간 t에 관한 2차식으로써 (속도 차 > 0) 일 때 허수의 시간이 구해질 수 있다. 시간 t는 항상 양수 이어야만 하므로 $v = -\text{abs}(v_err)$ 로 정의한다.

$$t = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 2j_{erk}(v_{abs} - c_2)}}{j_{erk}} \quad \text{---(4)}$$

위의 식으로 구해진 시간 t에 의해 속도차가 x일 때 가져야 할 가장 적당한 가속도 값을 실시간으로 계산해 낼 수 있다.

2.2 이동권한 레벨

진행 중인 열차는 자신의 위치와 앞 열차의 위치와 현재 진행 중인 선로의 제한 속도와 다음 진행해야 할 선로의 제한 속도 및 다음 선로까지의 거리 차 정보를 실시간으로 전송 받는다. 정보들로부터 다음과 같은 안전 운행 계획을 세울 수 있다.

1. 열차는 진행 중인 선로의 제한 속도를 넘어선 안 된다.
2. 열차는 다음 진행 할 선로에 진입하기 전에 다음 선로의 제한 속도까지 감속하여야 한다.
3. 앞 열차의 이동권한 레벨 중 황색 블록에 진입했다면 감속해야 한다.

따라서 앞 열차의 위치를 파악하고 절대 침범해서는 안 되는 적색구역, 감속을 하는 황색 구역, 앞 열차의 영향을 받지 않는 청색구역을 정하고 진행 중인 열차는 해당되는 구역에 따라 동작 하게 된다. 본지에서는 안전거리 제동 모델을 근거로 이동권한 레벨을 설정 하였다. 안전 제동거리의 고려사항을 간단히 살펴보면 허용초과 속도, 열차 속도 검지 오류, 시스템 반응 시간 및 지연 시간, 최악의 조건에서 과속도 검지에 대한 비상제동의 최대 반응, 비상 제동의 감속율, 선로의 구배 및 곡선 반경 등이 있고, 차상장치의 운영데이터 베이스에 트랙의 정보에 따라 다른 안전제동거리 정보가 저장 된다. 감시 제동 거리 S_{spv} 는 ATP(Automatic Train Protect)에 의해 감시되었을 때, 목표지점에 대한 상용 제동 거리이다. S_{spv} 에 대해서 황색 폐색 최소 길이를 계산하는데 사용된 최대 감시 제동거리 $S_{spv.y}$ 적색 폐색 최소 길이를 계산 하는데 사용되는 최소 감시 제동 거리 $S_{spv.r}$ 이 있다.

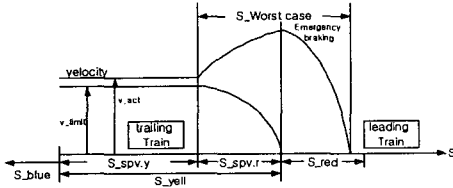


Fig. 3 Safety braking model

$$S_{spv.y} = jerk_{in} + \frac{1}{2} \frac{v_{enter}^2 - v_{out}^2}{-a_{spv}} + jerk_{out} + v_{enter} T_{SB}$$

($v_{enter} = v_{act}$, real)

$$S_{spv.r} = \frac{1}{2} \frac{v_{enter}^2}{-a_{spv}}$$

($v_{enter} = v_{limit}$)

$$jerk_{in} + jerk_{out} = \frac{v_{enter} \times (-a_{spv})}{2jerk_{rate}}$$

$jerk_{rate} = \max jerk$.

위 식으로부터 폐색의 끝에서 감시 제동을 어기지 않고 상용 정지를 할 수 있도록 하기 위해 황색 폐색에 대해 요구되는 최소 길이는 S_{yel} 로 다음과 같이 계산된다.

$$S_{yel} = S_{spv.y} + S_{spv.r}$$

2.3 Movement authority setting algorithm

2.2절에서 제시된 이동권한 레벨에 근거해 본지에서 제시하는 이동권한에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

A. 선로 제한속도의 경우

선로제한 속도를 넘지 않기 위해 목표속도를 선로의 제한 속도로 정한다. 목표 속도에 이르는 동안의 가속도는 2.1절에서 제시한 식에 의해 구해진다. 다음 선로의 제한 속도와 남은 거리를 체크하고, 열차가 다음선로의 황색구간에 침범 했을 때 감속을 시작한다. 이 때 황색 구간의 식은 다음과 같다.

$$S_{yel, track} = jerk_{in} + \frac{1}{2} \frac{v_{enter}^2 - v_{TrackLimitVelocity}^2}{-a_{spv}} + jerk_{out} + v_{enter} T_{SB}$$

($v_{enter} = v_{act}$, Measure value)

선로제한 속도에 관해서 적색 구간은 없다. 다음 선로의 황색 구간에 침범 하게 되면 실시간으로 다음 트랙 제한속도와 속도차이를 계산 한 후 2.1절의 (4)식에 대입하여 시간을 계산 한다. 구한 시간을 다시 2.1절의 (1)식에 대입 하여 현재 속도에서 가져야 할 최적의 가속도를 구하게 된다. 열차는 구해진 최적의 가속도까지 저크를 넘지 않는 한도 내에서 가속한다.

B. 선행열차에 의한 경우

목표 속도는 트랙 속도와 앞 열차의 속도 중 작은 값이 된다. 앞 열차의 황색구역을 침범한 경우이므로 목표속도를 앞 열차의 속도라 가정하고 감속을 행하게 된다. 이 때 제시된 가속도를 결정하는 알고리즘에 의하면 속도 차이만을 제로로 하기 위한 알고리즘이므로 트랙의 황색구역을 침범했을 때에는 다르게 앞 열차의 속도 및 뒤 열차의 감속 능력에 의해 유지되어야 할 거리가 지정되어야 한다. 이 거리는 열차의 길이에 따라 충분한 완충구간을 포함한다. 따라서 열차에 의한 황색 구간은 다음과 같이 재정의 된다.

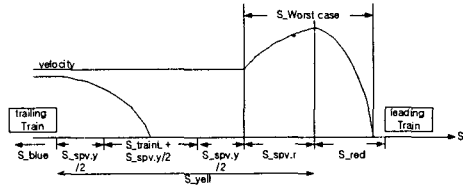


Fig. 4 New MBS level setting

$$S_{yellow, car} = S_{spv.y} + S_{running, area} + S_{spv.l} + S_{spv.r}$$

$$S_{running, area} = \frac{S_{spv.y} \times v}{2} + L_{train}$$

$$S_{spv.y} = S_{spv.l} = \frac{S_{spv.y} \times v}{2}$$

($L_{train} = \text{length of train}$)

열차가 $S_{yellow, car}$ 를 침범하게 되면 가장 좋은 경우 $S_{running, area}$ 내에서 속도차이는 제로가 된다. 앞 열차가 감속중이라면 $S_{running, area}$ 를 지나 $S_{spv.l}$ 에 진입 하여 속도차가 제로가 되거나 마이너스가 된다. 속도차가 제로인 경우 $S_{spv.l}$ 구역에서 열차가 운행하게 되므로 이 구역에선 무조건 감속하도록 설계한다.

C. 전체 알고리즘 구성도

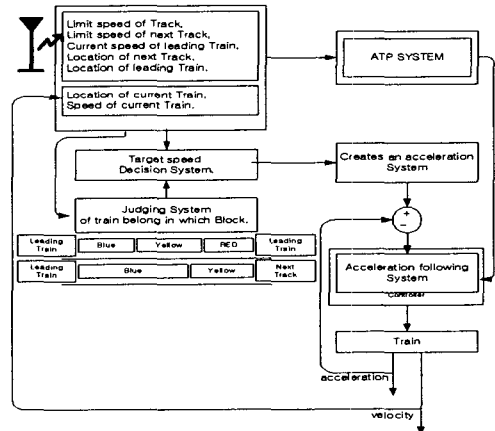


Fig. 5 Train movement algorithm Block diagram by MBS.

3. 시뮬레이션 결과

제시된 알고리즘의 효율성을 증명하기 위해 Matlab ver.6.5를 이용하여 다음과 같이 simulation 하였다.

3.1 시뮬레이션 구성

시뮬레이션을 위해 기차의 플랜트를 Fig.6 와 같이 점 질량을 가정하여 간단히 구성하였다.

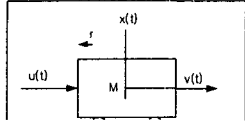


Fig. 6 Simple model of Train

$$\frac{dx(t)}{dt} = v(t)$$

$$\frac{dv(t)}{dt} = -rv(t) + \frac{1}{M}u(t)$$

(r : resistance, M : mass, $u(t)$: power [N])

simulation을 위하여 이산 상태 방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 1/r(1-e^{-rT}) \\ 0 & e^{-rT} \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} \frac{1}{Mr^2}(e^{-rT} + rT - 1) \\ \frac{1}{M}(1 - e^{-rT}) \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

($x = \begin{bmatrix} x(t) \\ v(t) \end{bmatrix}$)

전체 시뮬레이션 구성도는 다음과 같다.

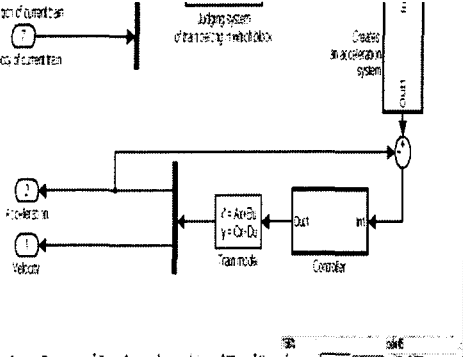


Fig. 7 시뮬레이션 구성도.

ATP블럭은 본지에서 다루고자 하는 부분이 아니므로 제외 하였다. 돌발 상황이 아닌 경우 ATP가 작동하는 상황이 있어선 안되기 때문이다.

3.2 시뮬레이션 결과

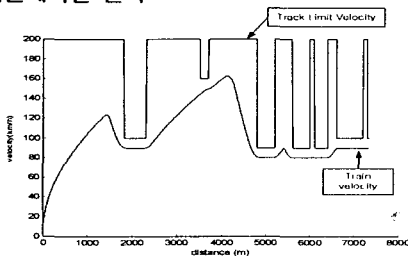


Fig. 8 트랙제한속도만 고려한 경우

결과에서 보는 바와 같이 다음 선로에 진입하기 전에 이미 제한속도까지 감속하는 것을 볼 수 있다.

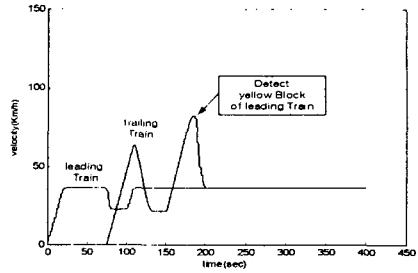


Fig 9 앞 열차까지 고려한 경우

Fig.9는 속도가 느린 앞 열차를 고려한 경우이다. 실제로 이러한 운행계획은 세우지 않겠지만 시뮬레이션을 위해 가정한 상황이다. 앞 열차의 최고 속도는 약 35Km/h 정도이고 뒷 열차의 최고 속도는 약 150Km/h 정도이다. 그림을 보면 알 수 있듯이 앞 열차는 80초 만에 다음 선로의 제한 속도인 25Km/h에 맞추기 위해 감속하였고 후행 열차가 그 때 출발하여 역시 25Km/h까지 감속했다가 선로제한속도까지 가속하던 중 약 170여초 만에 앞 열차의 황색 구간을 검지하고 앞 열차와 안전거리를 유지하며 앞 열차의 속도에 맞춰 감속하는 것을 보여준다.

4. Conclusion

본 연구에서는 통신기반 열차 운행 시스템에서 사용될 수 있는 이동권한 알고리즘에 대한 한 예를 제시 하였다. 본 연구가 제시한 알고리즘은 속도차를 간단한 식에 대입해서 실시간으로 열차가 가져야 할 적당한 가속도를 산출한다는 장점이 있다. 그에 따라 승차감에 영향을 주지 않고 안전하게 운행 할 수 있도록 한다. 본 연구가 제시한 알고리즘을 통해 속도 차에 따라 능동적으로 대처함으로써 운행효율도 늘릴 수 있으리라 생각된다.

[참고 문헌]

- [1] "Korea train transportation policy's course of MBS.", *Ministry of Construction & Transportation* (Korea).
- [2] S. A. Kim, S. H. Hong and J. B. Wang, "Application of GIS Technology for Developing Emergency Management System on High-Speed Lines" *Korean society for railway*, Vol. 20, No. 3, pp. 156-162, 2003.
- [3] SAMSUNG SDS, KORAIL. "MBS example equipment construction Model of braking safety"
- [4] D.H. Kim, S.H. Kim, and S.M. Oh " 다중 열차 시뮬레이션을 위한 철도시스템 모델", *Korean society for railway*, Vol. 11, No. 2, pp. 47-54, 2001.
- [5] Y.G. Youn "CBTC 이동폐색 열차제어방식에서의 열차 운행 상황 표시 방식에 대한 검토" *Korea railroad research institute* 2003.12.11.
- [6] Y.G. Kim, "유럽 철도망 통합을 위한 ERTMS 프로젝트 추진 현황" *Korea railroad research institute*. 2001.5
- [7] ADTRANZ, ALCATEL, ALSTOM, ANSALDO SIGNAL, INVENSYS RAIL, SIEMENS "System Requirements Specification. ERTMS/ETCS - class1" *Quic*.2003.