이동권한을 이용한 열차간격제어에 대한 연구

백종현, 김용규
한국철도기술연구원

The study of train separation control using movement authority

Jonghyen, Baek Yongkyu, Kim
Korea railroad research institute

Abstract - 현재 세계적인 열차제어의 추세는 궤도회로에 의한 고정폐색방식을 이용한 열차 운행이 아닌 발리스 또는 무선통신에 의한 이동권한을 이용한 열차제어방식을 적용하고 있으며, 국내에서도 이에 맞추어 철도청에서는 ATP 사업을 통하여 발리스에 의한 이동권한을 이용한 열차제어시스템을 적용하고 있다. 또한 분당선에서는 무선통신기반 열차제어시스템인 CBTC 시스템을 시범구축하고 있다. 본 논문에서는 이러한 이동권한을 이용한 열차간격제어에 대해 연구한 결과를 설명하고 있다.

1. 서 론

열차제어시스템은 선로 상황과 주변 환경에 관한 정보를 수집하여 여기에 맞게 자동적으로 열차의 속도를 제어하며 비상시에 열차를 제어할 수 있도록 함으로써 고속의 주행으로 고밀도 운전을 안전하게 실현할 수 있게 한다. 이러한 열차제어시스템에서도 중요한 부분 중의 하나는 열차의 출발에서부터 정지에 이르는 실제 열차의 운행에 따르는 운행제어라 할 수 있다. 운행 제어는 두 가지로 구분 할 수 있는데 하나는 열차의 가감속시에 열차에 가해지는 가감속력을 열차에 인가하여 열차의 속도변화시에 만족시켜야 하는 사양을 보장할 수 있도록 제어 입력을 생성하는 것이고 다른 하나는 전달되는 목표속도와 열차의 속도를 일치시키는 것이다. 열차의 운행 제어를 위해 사용되는 정보는 열차제어시스템에서 저장하고 있는 트랙 데이터베이스에서 오는 선로의 상태정보, 무선으로 오는 인접 열차의 위치정보와 현재 열차의 속도 정보를 들 수 있다. 이중에서 선로의 상태정보는 열차가 운행될 노선이 선정되면 결정되며 추정한 열차의 위치를 기본으로 저장된 데이터를 읽어 들임으로서 사용 할 수 있게 된다. 속도정보는 현재 열차의 운행 속도로서 차축에 설치되어 있는 타코메터로부터 일정한 시간 간격으로 읽어 들인다. 본 논문에서는 이동권한을 이용하여 열차간격제어를 수행하는 알고리즘과 개발된 알고리즘의 시뮬레이션 결과에 대해 보여주고 있다.

2. 이동권한에 의한 열차간격제어

본 논문에서 설명하고자 하는 이동권한에 의한 열차간격제어의 전반적인 개념도는 그림 1과 같다.

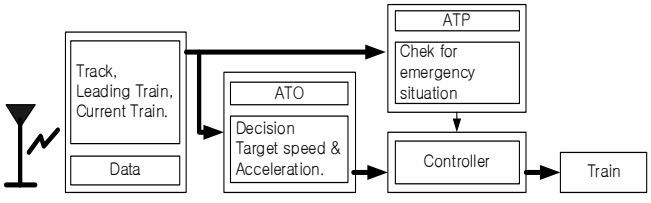

그림 1. 이동권한에 의한 열차간격제어 개념도

그림 1의 구성에 따라 2.1절에서 이동권한을 설정하는 방법에 대해 설명하고 2.2절에서는 이러한 방법에 의한 열차간격제어 알고리즘을 제시하였다.

2.1 이동권한 설정

열차는 자신의 위치와 앞 열차의 위치와 현재 진행 중인 선로의 제한속도와 다음 진행해야 할 선로의 제한 속도 및 다음 선로까지의 거리 정보를 실시간으로 전송 받으며 이러한 정보들을 이용하여 안전운행계획을 수립하여야 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 적합하도록 동작하게 된다. 본 논문에서는 이러한 안전거리 제동 모델을 근거로 이동권한을 설정하였다. 안전제동거리의 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 저장된다. 감시제동거리 Sspv는 ATP(Automatic Train Protect)에 의해 감시되었을 때, 목표지점에 대한 상용 제동 거리이다. Sspv 에 대해서 황색 폐색 최소길이를 계산하는데 사용된 최대 감시 제동거리 Sspv.y 적색 폐색 최소길이를 계산하는데 사용되는 최소 감시제동거리 Sspv.r 이 있다.

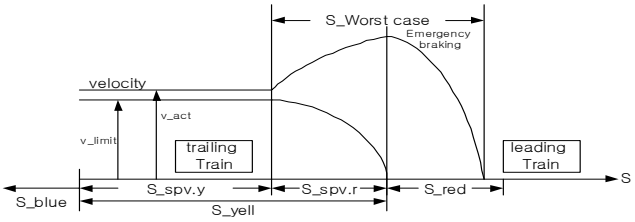

그림 2. 안전제동모델

$$S_{spv.y} = jerk_{in} + \frac{1}{2}\frac{v_{enter}^2 - v_{out}^2}{-a_{spv}} + jerk_{out} + v_{enter}T_{SB}$$
$$(v_{enter} = v_{act},\ real)$$
$$S_{spv.r} = \frac{1}{2}\frac{v_{enter}^2}{-a_{spv}}$$
$$(v_{enter} = v_{limit})$$
$$jerk_{in} + jerk_{out} = \frac{v_{enter} \times (-a_{spv})}{2jerk_{rate}}$$
$$jerk_{rate} = \max\ jerk\,.$$

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

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

2.2 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘

2.2.1 선로제한속도에 의한 이동권한 설정

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 다음 선로의 황색구간에 침범 했을 때 감속을 시작한다. 이 때 황색 구간의 식은 다음과 같다.

$$S_{yel.track} = jerk_{in} + \frac{1}{2}\frac{v_{enter}^2 - v_{track.limit.velocity}^2}{-a_{spv}} + jerk_{out} + v_{enter}T_{SB}$$
$$(v_{enter} = v_{act},\ Measure\ \ value)$$

선로제한 속도에 관해서 적색 구간은 없다. 다음 선로의 황색 구간에 침범 하게 되면 실시간으로 다음 트랙 제한속도와의 속도차이를 계산한 후 시간을 계산 한다. 구한 시간에 의해 현재 속도에서 가져야 할 최

적의 가속도를 구하게 된다. 열차는 구해진 최적의 가속도까지 저크를 넘지 않는 한도 내에서 가속한다.

2.2.2 선행열차에 의한 이동권한 설정

선로제한 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 때와는 다르게 앞 열차의 속도 및 뒤 열차의 감속 능력에 의해 유지되어야 할 거리가 지정되어져야 한다. 이 거리는 열차의 길이에 따라 충분한 완충구간을 포함한다. 따라서 열차에 의한 황색구간은 다음과 같이 재정의 할 수 있다.

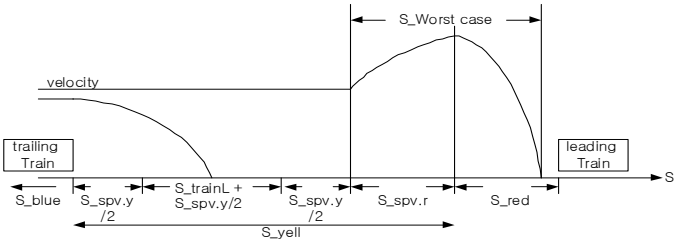

그림 3. 개선된 안전제동모델

$$S_{yellow.car} = S_{spv.y1} + S_{running.area} + S_{spv.y2} + S_{spv.r}$$

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

$$S_{spv.y1} = S_{spv.y2} = \frac{S_{spv.y}}{2}$$

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

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 $S_{spv.y2}$에 진입 하여 속도차가 제로가 되거나 마이너스가 된다. 속도차가 제로인 경우 $S_{spv.y2}$구역에서 열차가 운행하게 되므로 이 구역에선 무조건 감속하도록 설계한다.

2.2.3 전체 알고리즘 구성도

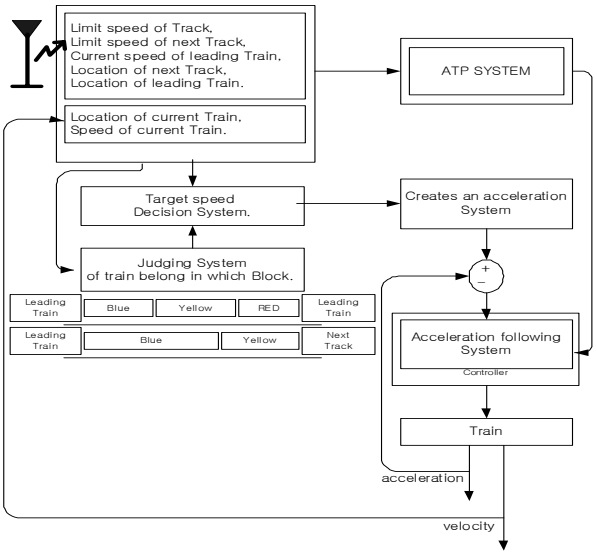

그림 4. 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘

3. 시뮬레이션 및 결과

개발된 알고리즘의 기본 성능을 분석하기 위해 Matlab ver6.5를 이용하여 그림 5와 같이 시뮬링크 모델을 구성하였으며 그러한 결과는 그림 6에서 보여주고 있다.

시뮬레이션을 수행한 노선은 서울-시흥 구간으로 설정하였으며, 설정 배경은 KTX와 기존의 새마을호, 무궁화호, 화물열차 등이 복합적으로 운행되는 구간으로서 현재 한국철도의 운행시격을 저해시키는 대표적인 병목구간이기 때문이다.

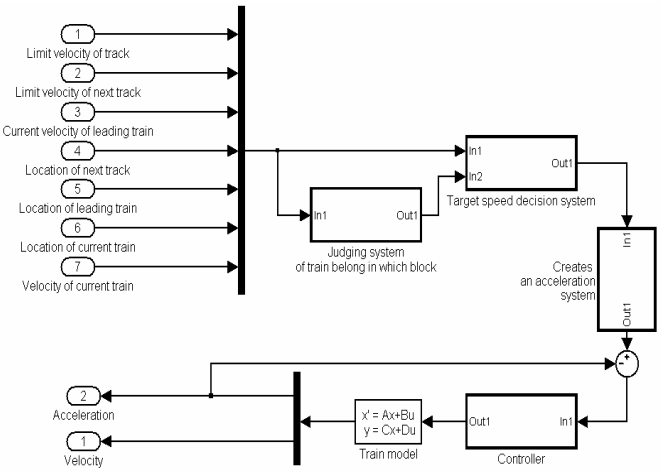

그림 5. 시뮬레이션 구성도

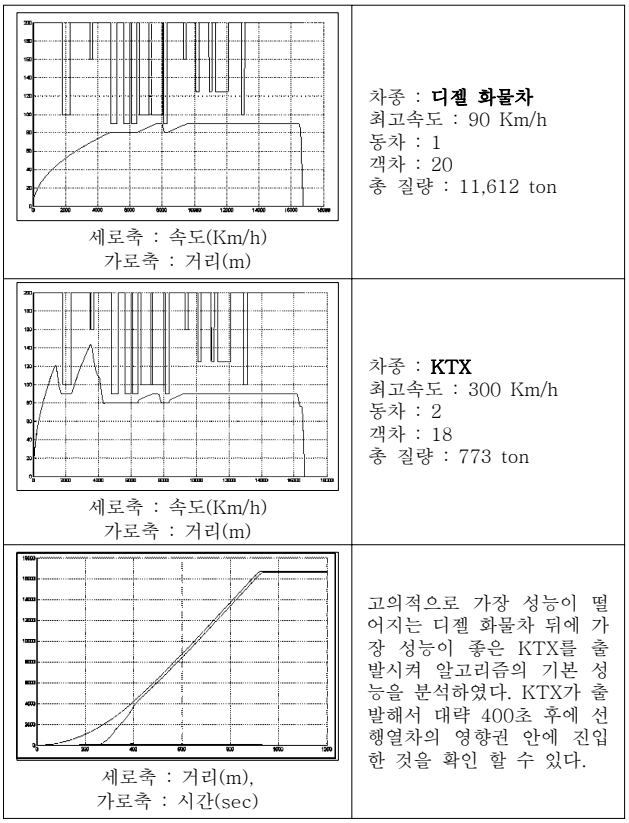

그림 6. 시뮬레이션 결과

4. 결 론

본 논문에서는 ERTMS/ETCS 시스템의 개념을 기반으로 하여 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘을 개발하고 개발된 알고리즘의 성능을 확인하기 위해 서울-시흥 구간을 대상으로 하여 시뮬레이션 해보았다. 본 논문에서 개발한 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. 이러한 알고리즘은 향후 시스템 개발시 이를 응용하여 적용하는데 많은 도움이 될 것으로 기대된다.