

# 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘 개발

## The Development of Train Spacing Algorithm by Movement Authority

백종현\*                      김용규\*\*                      이재호\*\*\*  
Baek, Jonghyen            Kim, Yongkyu              Lee, Jaeho

**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 통신기반 열차제어시스템인 CBTC 시스템을 시범구축하고 있다. 이러한 추세에 맞추어 통신기반 열차 제어 시스템을 적용하기 위한 열차제어 알고리즘이 요구되며, 본 논문에서는 이러한 이동권한에 의한 열차제어 알고리즘을 개발하고 이를 시뮬레이션 하였다.

**Key Words** : '열차제어시스템 : 이동권한 : 무선통신 : CBTC(Communication Based Train Control) : 알고리즘'

### 1. 서론

통신기반 열차 제어 시스템 하에서 차량이 선로를 따라 운행할 때 안전 운행에 필요한 데이터들이 차상장치에 의해 받아들여진다. 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 안전하게 계획대로 운행되도록 하기 위한 열차제어시스템이 요구된다. 이러한 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 운행 제어라 할 수 있다. 운행 제어는 두 가지로 구분 할 수 있는데 하나는 열차의 가속시에 열차가 가해지는 가속속력을 열차에 인가하여 열차의 속도변화에 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. 이 중에서 선로의 상태정보는 열차가 운행될 노선이 선정되면 결정되며 추정할 열차의 위치를 기본으로 저장된 데이터를 읽어 들임으로서 사용할 수 있게 된다. 속도정보는 현재 열차의 운행

속도로서 차측에 설치되어 있는 타코미터로부터 일정한 시간 간격으로 읽어 들인다.

본 논문에서는 이동권한을 이용하여 열차간격제어를 수행하는 알고리즘을 개발하였으며 개발된 알고리즘은 수치 연산 프로그램을 이용하여 모의 실험하였다.

### 2. 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘

본 논문에서 개발하고자 하는 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘의 전반적인 개념도는 그림 1과 같다.

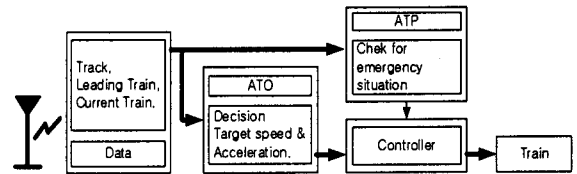


그림 1. 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘의 개념도.

그림 1의 구성에 따라 2.1절에서는 열차가 가져야 하는 최적의 가속 형태에 대해 설명하고 2.2절에서 이동권한을 설정하는 방법에 대해 설명한다. 2.1절과 2.2절의 내용을 토대로 2.3절에서는 개발된 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘을 제시하였다.

#### 2.1 저크를 고려한 열차의 가속 형태

열차운행 중 승객의 승차감을 저해하지 않기 위해 승객이 저크를 느끼지 못하는 범위 내에서 가속 및 감속이 이루어져야 한다. 따라서 어떤 목표속도가 정해 졌을 때 그 목표속도까지 운행하기 위해 다음과 같은 속도 프로필을 가져야 한다. 문제는 최고 가속도까지 도달하는 것이 아니라 감속을 해야 하는 시점이라고 할 수 있다. 다음의 수식을 통해 그 시점을 결정할 수 있다.

#### 저자 소개

- \* 正 會 員 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- \*\* 正 會 員 : 한국철도기술연구원 책임연구원
- \*\*\* 正 會 員 : 한국철도기술연구원 책임연구원

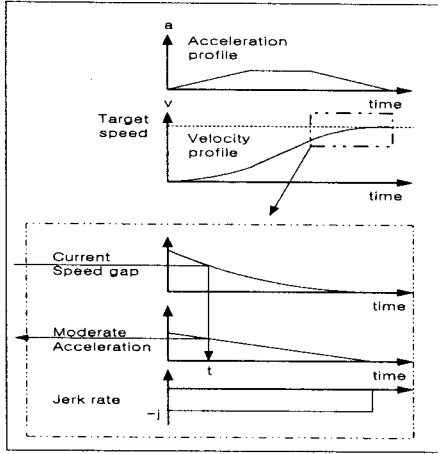


그림 2. 저크율에 의한 가속도 계산

$$jerk_{rate} = jerk \quad (\text{Constant value})$$

$$a = jerk \times t + c_1 \quad \text{---(1)}$$

$$v = \frac{1}{2} jerk \times t^2 + c_1 t + c_2 \quad \text{---(2)}$$

( $a = \text{acceleration}$ ,  $v = \text{velocity}$ )

$$t = \frac{-c_1 \pm \sqrt{c_1^2 - 2jerk(c_2 - v)}}{jerk} \quad \text{---(3)}$$

$$t = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 2jerk(v_{abs} - c_2)}}{jerk} \Big|_{v_{abs} = |v|} \quad \text{---(4)}$$

위의 식으로 구해진 시간  $t$ 에 의해 속도차가  $x$ 일 때 가져야 할 가장 적당한 가속도 값을 실시간으로 계산해 낼 수 있다.

## 2.2 이동권한 설정

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. 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 안전제거리의 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  $S_{spv}$ 는 ATP(Automatic Train Protect)에 의해 감시되었을 때, 목표지점에 대한 상용 제동거리이다.  $S_{spv}$ 에 대해서 황색 폐색 최소 길이를 계산하는데 사용된 최대 감시 제동거리  $S_{spv.y}$  적색 폐색 최소 길이를 계산하는데 사용되는 최소 감시제동거리  $S_{spv.r}$ 이 있다.

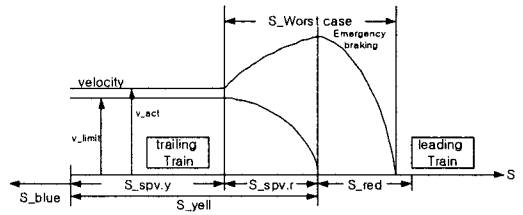


그림 3. 안전제동모델

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

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

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

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

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

$$jerk_{rate} = \max jerk.$$

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

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

## 2.3 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘 개발

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

### 2.3.1 선로제한속도의 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.

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

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

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.

### 2.3.2 선형열차에 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 때와는 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 황색구간은 다음과 같이 재정의 된다.

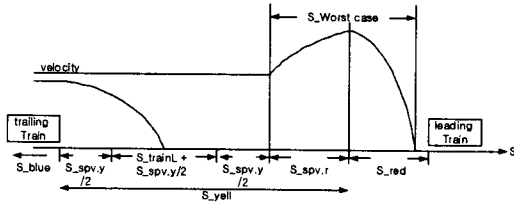


그림 4. 개선된 안전제동모델

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

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

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

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

열차가  $S_{yellow, car}$  를 침범하게 되면 가장 좋은 경우  $S_{narrowing, area}$  내에서 속도차이는 제로가 된다. 앞 열차가 감속중이라면  $S_{narrowing, area}$  를 지나  $S_{spv.y2}$  에 진입 하여 속도차가 제로가 되거나 마이너스가 된다. 속도차가 제로인 경우  $S_{spv.y}$  구역에서 열차가 운행하게 되므로 이 구역에선 무조건 감속하도록 설계한다.

### 2.3.3 전체 알고리즘 구성도

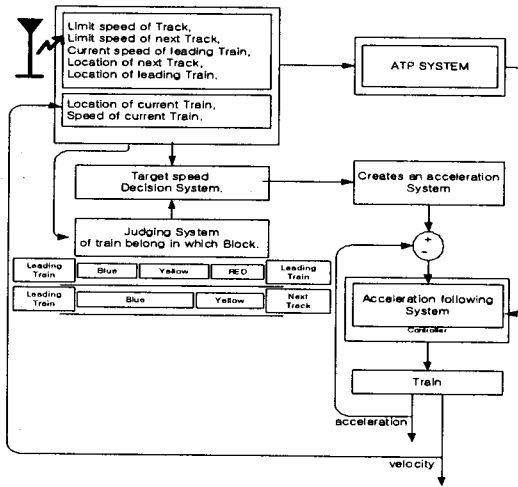


그림 5. 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘

### 3. 시뮬레이션 및 결과

개발된 알고리즘의 기본 성능을 분석하기 위해 Matlab ver6.5를 이용하여 그림 6과 같이 시뮬레이션하였다. 시뮬레이션을 수행한 노선은 서울-시흥 구간으로 설정하였으며, 설정배경은 KTX와 기존의 새마을호, 무궁화호, 화물열차 등이 복합적으로 운행되는 구간으로서 현재 한국철도의 운행 시격을 저해시키는 대표적인 병목구간이기 때문이다.

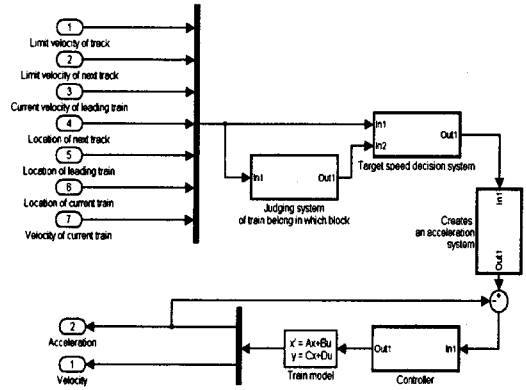


그림 6. 시뮬레이션 구성도.

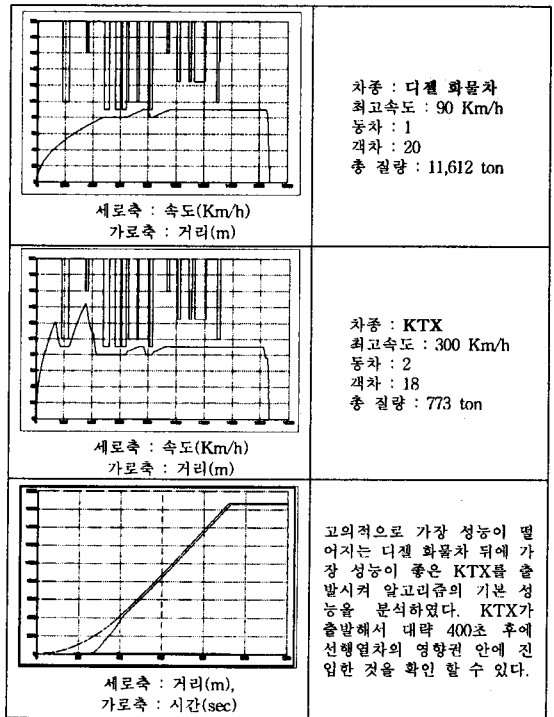


그림 7. 시뮬레이션 결과

### 4. 결론

본 논문에서는 ERTMS/ETCS 시스템의 개념을 기반으로 하여 이동권한에 의한 열차간격제어 알고리즘을 개발하였다. 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 한국철도기술연구원에서 시스템 개발시 이를 응용하여 적용할 수 있을 것이다.