

통신기반 열차제어시스템에서의 다편성 열차간격제어를 위한 알고리즘 개발

백종현
한국철도기술연구원

The Development of Automatic Multi Train Spacing Algorithm Using Communication

Baek, Jong Hyen
KRRRI(Korea Railroad Research Institute)

Abstract - Communication based train control system is applied regularly worldwide. And this system may be used in domestic soon. Communication based train control system does not depend on conventional track circuit. Therefore, position and distance control of train to prevent collision with leading train may become important safety factor. This paper developed collision avoidance algorithm to control trains of several units efficiently for this. In developing a collision avoidance algorithm, it is desirable to avoid the need for additional system. Additional system restricts the development of the algorithm by limiting the effectiveness of the algorithm to only those areas where the additional system can be afforded and has been installed.

1. 서론

통신기반 열차제어시스템의 차상장치는 운행되는 모든 열차에 설치되어 있으며, 선로를 따라 운행할 때 열차 안전운행에 필요한 데이터들이 인접한 열차나 지상장치와의 통신을 통하여 송수신된다. 열차에 설치된 각각의 차상장치는 인접한 열차의 위치, 속도, 가속도 등의 정보를 통신을 통하여 지속적으로 알 수 있기 때문에 선행 열차와의 안전거리 침범을 피하기 위한 감속도가 결정될 수 있다. 이러한 감속도는 두 편성의 열차운행시에 대한 알고리즘을 통해 결정되며, 이러한 알고리즘은 여러 편성의 열차운행에도 적용할 수 있도록 확장하여야 한다. 본 논문에서 개발된 알고리즘은 선행열차와의 안전거리 침범을 피하기 위해 요구되는 감속도를 산출하는 것에서부터 시작하였다. 이것은 선행열차와의 안전거리를 침범하지 않기 위한 후행열차의 동작을 결정하기 위함이며, 특히 선행열차가 그것의 선행열차와의 안전거리를 침범하지 않기 위한 동작을 고려하여야 한다. 어떤 특정 시간에서 열차 T_1 는 선로를 따라 운행되는 거리 $s_1(t)$, 속도 $v_1(t)$ 및 가속도 $a_1(t)$ 에 의해 특성이 부여된다. 그림 1에서는 가속도가 없는 두 편성의 열차를 보여주고 있다. 시간이 0인 수직축에서 다르게 표시된 선행열차 T_2 와 후행열차 T_1 은 두 개의 직선으로 표현되고 있으며 후행열차가 선행열차보다 더 큰 속도(기울기)를 가지고 있으므로 안전거리를 침범하는 시간에 후행열차는 정지하여야 한다. 그림 2에서는 일정한 감속도를 가지는 한 편성의 열차를 표현하였다. 이 열차는 감속이 시작되는 시간 b 까지는 일정한 속도로 운행한다. 이러한 감속은 열차가 초기 속도보다 낮은 일정한 속도로 계속되어 가는 시간 e 까지 계속된다. 물론 이러한 설명은 실제 열차의 동작을 간략화 한 것이다. 실제의 열차운행에서는 시간 0과 b 사이에서, 그리고 시간 e 이후에는 다른 비율로서 가속 또는 감속되기 때문이다. 본 논문에서는 우선 두 편성의 열차운행 상황을 고려하여 선행열차가 보다 앞서있는 다른 열차와의 상황에 맞추어 감속 또는 가속할 때 후행열차가 어떻게 동작되어야 하는지를 결정하였다. 또한 이를 기반으로 여러 편성의 열차운행 상황을 고려한 후행열차의 동작 상태를 결정하였다.

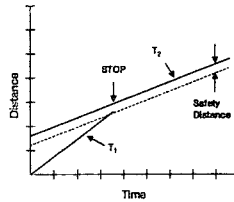


그림 1. 가속이 없는 두 편성의 열차

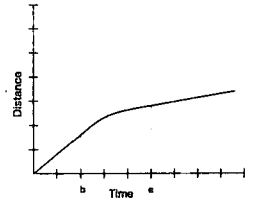


그림 2. 감속되는 한 편성의 열차

2. 두 편성 열차운행시의 감속도 계산

선행열차와의 안전거리를 침범하지 않기 위해 필요한 후행열차의 감속도를 결정하기 위해서는 후행열차 시스템의 반응 및 동작시간이 고려되어야 한다. 기본적으로 열차는 어느 정도의 동작시간을 가지기 때문에, 다음과 같은 두 가지 경우를 생각해볼 수 있다. 첫 번째로, 선행열차의 급격한 감속으로 인하여 후행열차가 감속하기 전에 선행열차와의 안전거리를 침범하는 것이다. 다른 경우는, 후행열차가 선행열차와의 안전거리를 침범하기 전에 동작하여 충분한 제동력으로 안전거리를 침범하지 않는 것이다.

2.1 후행열차 반응 전 발생하는 안전거리 침범

후행열차의 반응 전에 선행열차와의 안전거리를 침범하는 경우에 대해 그림 3에서는 세 가지의 안전거리 침범 시나리오를 보여주고 있다. 그림 3의 a는 후행열차가 선행열차를 따라 잡았기 때문에 안전거리를 침범하는 단순한 경우이다. 그림 3의 b에서는 T_2 가 보다 앞서 있는 다른 열차와의 안전거리를 침범하지 않기 위해 감속하는 동안 T_1 이 T_2 와의 안전거리를 침범한다. 그림 3의 c에서는 T_2 가 앞서 있는 열차에 대한 안전거리 침범 회피 동작을 끝냈을 때, T_1 이 T_2 와의 안전거리를 침범하는 경우이다.

$$v_2(t) = \begin{cases} v_2(0) + a_2(0) \cdot t, & t \leq b_2 \\ v_2(b_2) + a_2(b_2) \cdot (t - b_2), & b_2 < t \leq e_2 \\ v_2(e_2) + a_2(e_2) \cdot (t - e_2), & t > e_2 \end{cases} \quad (1)$$

$$s_2(t) = \begin{cases} s_2(0) + v_2(0) \cdot t + \frac{1}{2} a_2(0) \cdot t^2, & t \leq b_2 \\ s_2(b_2) + v_2(b_2) \cdot (t - b_2) + \frac{1}{2} a_2(b_2) \cdot (t - b_2)^2, & b_2 < t \leq e_2 \\ s_2(e_2) + v_2(e_2) \cdot (t - e_2) + \frac{1}{2} a_2(e_2) \cdot (t - e_2)^2, & t > e_2 \end{cases} \quad (2)$$

$$v_2(t) = v_2(\tau_2) + a_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2) \quad (3)$$

$$s_2(t) = s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2)^2 \quad (4)$$

$$\text{여기에서 } \tau_2 = \begin{cases} 0, & t \leq b_2 \\ b_2, & b_2 < t \leq e_2 \\ e_2, & t > e_2 \end{cases} \quad (5)$$

여기에서 선행열차 T_2 의 위치와 속도는 시간 0과 b_2

사이에서의 $a_2(0)$, 그리고 시간 b_2 와 e_2 사이에서의 일정한 가속도를 $a_2(b_2)$, 시간 e_2 후의 일정한 가속도를 $a_2(e_2)$ 등의 변수를 가지는 식 (1), (2)처럼 표현하거나 식 (3), (4)처럼 표현할 수 있다.

위의 경우와 비슷하게 시간 t 의 함수로서 T_1 의 속도와 위치는 식 (6)과 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$v_1(t) = v_1(0) + a_1(0) \cdot t \quad (6)$$

$$s_1(t) = s_1(0) + v_1(0) \cdot t + \frac{1}{2} a_1(0) \cdot t^2 \quad (7)$$

열차가 감속하기 전에 안전거리를 침범하기 때문에, 비상제동에 의한 급격한 제동은 돌이킬 수 없지만, 최소한 선행열차와의 충돌은 피할 수 있어야 한다. L_2 는 열차 T_2 의 길이에 열차사이에서 절대적으로 유지되어야 하는 안전거리를 합한 값이다. 위치 데이터에서 예상되는 오차까지 고려한 값이어야 한다.

식 (4)와 (7)로부터 $s_2(t_i) - s_1(t_i) = L_2$ 는 식 (8) 또는 (9)와 같이 표현된다.

$$[s_2(t_2) + v_2(t_2) \cdot (t_i - t_2) + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot (t_i - t_2)^2] - \quad (8)$$

$$[s_1(0) + v_1(0) \cdot t_i + \frac{1}{2} a_1(0) \cdot t_i^2] = L_2$$

$$\frac{1}{2} [a_2(t_2) + a_1(0)] \cdot t_i^2 + [v_2(t_2) - a_2(t_2) \cdot t_2 + v_1(0)] \cdot t_i + [s_2(t_2) - v_2(t_2) \cdot t_2 + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot t_2^2 - s_1(0) - L_2] = 0 \quad (9)$$

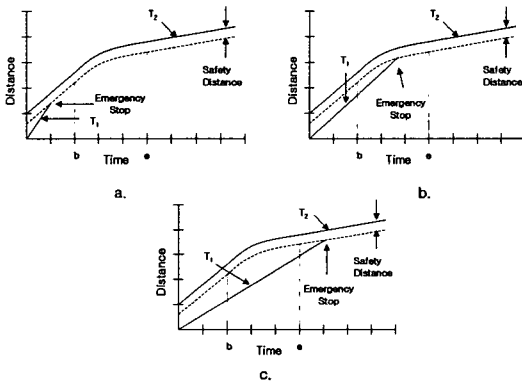


그림 3. 후행열차 감속 전 안전거리 침범에 대한 세 가지 시나리오 : a. 선행열차 감속 전 안전거리 침범, b. 선행열차 감속 동안 안전거리 침범, c. 선행열차 감속 후 안전거리 침범

식 (9)는 2차 방정식으로 표현되므로 두 가지의 해가 도출될 것이다. 두 가지의 해 중에서 t_i 를 위해 보다 작은 값이 앞으로 설명하는 조건에 적합할 것이다. t_i 를 위한 표현식에서 $t_2=0$ 라고 한다면, 시간 0과 b_2 사이에서 안전거리 침범이 발생한다고 가정할 수 있다. 만약 식 (9)로부터 t_i 에 대한 해가 시간 0과 b_2 사이에 있다면, 안전거리 침범은 t_i 의 계산된 값에서 발생할 것이다. 그리고 안전거리 침범시 속도의 차이는 식 (3)과 (6)에서 t 대신에 t_i 를 대입하여 얻어낼 수 있다. 만약, t_i 에 대한 해가 시간 0과 b_2 사이에 없고, 안전거리 침범이 발생한다면, 시간 b_2 후에 일어날 것이다.

$t_2 = b_2$ 라고 하면, 안전거리 침범은 시간 b_2 와 e_2 사이에서 발생한다고 가정할 수 있다. 이 때 t_i 의 해를 구하고 그것이 b_2 와 e_2 사이에 있는 지를 확인한다. 여기에서 얻어진 t_i 의 해가 b_2 와 e_2 사이에 있다면, 안전거리 침범시의 속도 차이는 위에서 설명한 것과 같이 구할 수 있을 것이다. 만약 t_i 가 e_2 사이에 없다면, 안전거리 침범은 시간 e_2 이후에 발생한 것으로 가정할 수 있다. 그렇다면 $t_2 = e_2$ 라고 놓고 위의 과정을 반복하여야 한다.

2.2 후행열차 반응 후에 필요한 감속도

두 번째 경우에는, 후행열차의 일반적인 제동성능이 충분하다고 가정한다면, 안전거리 침범은 피할 수 있다. 따라서 선행열차와의 안전거리 침범을 피하기 위해 필요한 감속의 양을 결정하여야 한다. 일단 필요한 감속량을 알게 되면, 정해진 열차의 최대 허용 감속도와 비교하여야 하며, 이것이 열차의 제동특성 내에 있다면 안전거리 침범은 발생하지 않을 수 있다.

선행열차와 후행열차의 거리가 아무리 가깝더라도 후행열차의 속도가 선행열차의 속도와 같거나 작다면 안전거리 침범은 발생하지 않을 것이다.

$$v_1(t) \leq v_2(t) \text{ and } s_2(t) - s_1(t) = L_2 \quad (10)$$

선행열차는 또한 보다 앞에 있는 다른 열차에 반응하여 감속할 수도 있는데, 이에 대해 그림 4에서 보여지는 것처럼 세 가지 가능한 안전거리 침범 회피 시나리오가 있다. 각각의 경우에서 식 (10)의 조건은 두 개의 곡선이 교차할 때 충족된다.

그림 4의 a에서 선행열차의 감속이 시작되기 전에 식 (10)의 조건이 충족될 수 있도록 후행열차는 감속한다. 이러한 상황은 선행열차가 보다 앞에 있는 다른 열차에 의하여 영향을 받지 않을 때나 제동장치가 동작하기 전에 긴 반응시간을 가질 때 발생할 수 있다. 그림 4의 b에서는 선행열차가 감속하는 중간에 식 (10)의 조건이 충족되며 c에서는 선행열차가 보다 앞에 있는 다른 열차에 의한 영향에 의해서나 다른 이유로 인하여 감속된 후에 식 (10)의 조건들이 충족된다.

여기에서 선행열차 T_2 는 시간 0과 b_2 사이에서의 일정한 가속을 $a_2(0)$, 시간 b_2 와 e_2 사이에서의 감속을 $a_2(b_2)$, 그리고 시간 e_2 후의 일정한 가속을 $a_2(e_2)$ 을 유지한다고 가정하면, 시간 t 에서의 선행열차 V_2 의 위치와 속도는 식 (11)과 (12)처럼 표현된다.

$$v_2(t) = v_2(t_2) + a_2(t_2) \cdot (t - t_2) \quad (11)$$

$$s_2(t) = s_2(t_2) + v_2(t_2) \cdot (t - t_2) + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot (t - t_2)^2 \quad (12)$$

$$\text{여기에서, } t_2 = \begin{cases} 0, & t \leq b_2 \\ b_2, & b_2 < t \leq e_2 \\ e_2, & t > e_2 \end{cases} \quad (13)$$

이러한 경우에, 후행열차 T_1 은 선행열차와의 충돌을 피하기 위해 제동장치를 동작시킬 것이므로, 시간 t 의 함수인 후행열차 T_1 의 속도와 위치는 t 가 b_1 보다 클 때, 식 (14)와 (15)에 의해 얻을 수 있다.

$$v_1(t) = v_1(b_1) + a_1(b_1) \cdot (t - b_1) \quad (14)$$

$$s_1(t) = s_1(b_1) + v_1(b_1) \cdot (t - b_1) + \frac{1}{2} a_1(b_1) \cdot (t - b_1)^2 \quad (15)$$

시간 b_1 에서 감속을 시작할 때, 후행열차 T_1 에 의해 요구되는 감속도는 위의 식에서 $a_1(b_1)$ 으로 표현되어 있다. 식 (11), (12), (14), 그리고 (15)를 이용하여 $a_1(b_1)$ 과 e_1 에 대해 정리하면 다음과 같은 식 (16)과 (17)이 도출된다.

$$a_1(b_1) = \frac{[-[v_2(t_2) + a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) - v_1(b_1)]^2] / [2 \cdot [s_2(t_2) + v_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2)^2 - s_1(b_1) - L_2]] + a_2(t_2)}{2} \quad (16)$$

$$e_1 = \frac{[-2 \cdot [s_2(t_2) + v_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2)^2 - s_1(b_1) - L_2] / [v_2(t_2) + a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) - v_1(b_1)]] + b_1}{2} \quad (17)$$

그리고, 열차 T_1 과 T_2 사이의 속도와 거리의 차이를 각각 ΔV_{12} 와 ΔS_{12} 라고 정의하면,

$$\Delta V_{12}(t_2) = v_2(t_2) + a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) - v_1(b_1) \quad (18)$$

$$\Delta S_{12}(t_2) = s_2(t_2) + v_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2) + \frac{1}{2} a_2(t_2) \cdot (b_1 - t_2)^2 - s_1(b_1) - L_2 \quad (19)$$

식 (18)과 (19)를 이용하여 식 (16)과 (17)을 다시 표현하면 다음과 같은 식이 된다.

$$a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(t_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(t_2)} + a_2(t_2) \quad (20)$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(t_2)}{\Delta V_{12}(t_2)} + b_1 \quad (21)$$

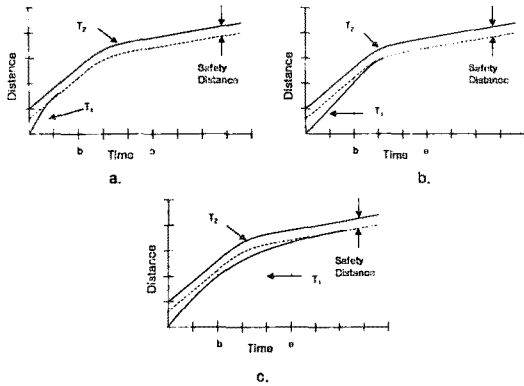


그림 4. 세 가지 안전거리 침범 회피 시나리오 :
a. 선행열차 감속 전 회피, b. 선행열차 감속 동안의 회피, c. 선행열차 감속 후의 회피

2.3 두 편성 열차운행시의 알고리즘 개발

본 논문에서 개발된 알고리즘은 후행열차가 선행열차와의 안전거리 침범을 회피하기 위해 $a_1(b_1)$, e_1 , $a_1(e_1)$ 을 결정하기 위한 절차이며, 아래와 같은 알고리즘으로 표현된다. 이 알고리즘은 선행열차를 위한 거리-시간 파라미터 성분($s_2(0)$, $v_2(0)$, $a_2(0)$, b_2 , $a_2(b_2)$, e_2 , $a_2(e_2)$)과 후행열차의 현재 상태($s_1(0)$, $v_1(0)$, $a_1(0)$, b_1) 등이다.

if $\left(0 \leq \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(0)}{\Delta V_{12}(0)} + b_1 \leq b_2\right)$ then

$$a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(0)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(0)} + a_2(0);$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(0)}{\Delta V_{12}(0)} + b_1, \quad a_1(e_1) = 0;$$

else if $\left(b_2 < \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(b_2)}{\Delta V_{12}(b_2)} + b_1 \leq e_2\right)$ then

$$a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(b_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(b_2)} + a_2(b_2);$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(b_2)}{\Delta V_{12}(b_2)} + b_1, \quad a_1(e_1) = 0;$$

else if $\left(e_2 < \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(e_2)}{\Delta V_{12}(e_2)} + b_1\right)$ then

$$a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(e_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(e_2)} + a_2(e_2);$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(e_2)}{\Delta V_{12}(e_2)} + b_1, \quad a_1(e_1) = 0;$$

else $a_1(b_1) = a_1(0); \quad e_1 = \infty; \quad a_1(e_1) = 0;$

3. 다편성 열차운행시의 알고리즘

앞 절에서 사용된 알고리즘은 후행열차가 선행열차와의 안전거리를 침범하는 것을 피하기 위해 적합한 거리-시간 곡선을 결정하는 것이었다. 이것은 어떤 선행열차 T_{i-1} 에 대한 후행열차 T_i 에서 요구되는 감속이 결정되는 것으로 간단하게 일반화시킬 수 있다. 현재의 위치, 속도, 가속, 각 열차의 길이는 열차간 통신을 통해 알 수 있기 때문에 앞 절에서의 연산과정의 결과물 이용하면 $s_i(0)$, $v_i(0)$, $a_i(0)$, b_i , L_{i-1} , $s_{i-1}(0)$, $v_{i-1}(0)$, $a_{i-1}(0)$, b_{i-1} , $a_{i-1}(b_{i-1})$, e_{i-1} 및 $a_{i-1}(e_{i-1})$ 의 입력정보를 가지고 구하고자 하는 결과인 $a_i(b_i)$, e_i , $a_i(e_i)$ 를 구할 수 있다. 이러한 과정을 바탕으로 다음의 식 (22)와 같이 12개의 입력요소를 가진 순환함수 Φ 를 정의할 수 있다. 이러한 식

(22)에서의 순환함수 Φ 는 12개 입력요소 중 마지막 세 입력요소인 $a_{i-1}(b_{i-1})$, e_{i-1} 및 $a_{i-1}(e_{i-1})$ 는 열차 T_{i-1} 과 T_{i-2} 의 연산과정에서 나오는 결과물 사용해야 한다. 따라서 순환함수 Φ 를 정의하려면 이러한 순환을 중지시키기 위한 조건, 즉 $a_n(b_n)$, e_n 및 $a_n(e_n)$ 에 대한 값들이 필요하다.

$$\begin{aligned} (a_i(b_i), e_i, a_i(e_i)) &= \Phi(s_i(0), v_i(0), a_i(0), b_i, L_{i+1}, s_{i+1}(0), \\ &v_{i+1}(0), a_{i+1}(0), b_{i+1}, a_{i+1}(b_{i+1}), e_{i+1}, a_{i+1}(e_{i+1})) \\ i &= 1, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (22)$$

열차 T_1 에서는 T_n 까지의 열차까지만 데이터통신이 가능하지만, T_2 에서는 T_{n-1} 까지의 열차까지 가능하다. 따라서 $a_n(b_n)$, e_n 및 $a_n(e_n)$ 의 정보는 앞에서 설명하였듯이 T_n 과 T_{n-1} 열차의 연산과정을 통해 구할 수 있다. 그러나 본 논문에서는 열차 T_n 이 초기 가속 상태($a_n(0)$)를 유지한다고 가정한다. 따라서 $a_n(b_n) = a_n(0)$ 이고, $e_n = \infty$ 로 열차가 등속운전을 한다고 보면 다음의 식(23)과 같이 수식을 확장시킬 수 있다. 그림 5에서는 다편성 열차운행시를 고려한 식(23)을 도식적으로 보기 쉽게 설명해주고 있다.

$$\begin{aligned} (a_1(b_1), e_1, a_1(e_1)) &= \\ \Phi(s_1(0), v_1(0), a_1(0), b_1, L_2, s_2(0), v_2(0), a_2(0), b_2, \\ \Phi(s_2(0), v_2(0), a_2(0), b_2, L_3, s_3(0), v_3(0), a_3(0), b_3, \end{aligned}$$

$$\Phi(s_{n-2}(0), v_{n-2}(0), a_{n-2}(0), b_{n-2}, L_{n-1}, s_{n-1}(0), v_{n-1}(0), a_{n-1}(0), b_{n-1},$$

$$\Phi(s_n(0), v_n(0), a_n(0), b_n, L_{n+1}, s_{n+1}(0), v_{n+1}(0), a_{n+1}(0), b_{n+1}, \infty, a_n(0), \dots)$$

(23)

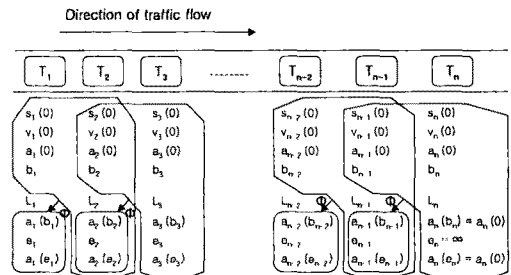


그림 5. 다편성 열차운행시의 알고리즘

4. 결 론

본 논문에서는 레도회로가 없는 통신 기반 열차제어시스템에서 다편성 열차들의 간격 제어를 위한 알고리즘을 고안하였다. 인접한 열차의 정보는 통신을 통하여 지속적으로 송수신되고 이에 선행열차와의 안전거리 침범을 피하기 위한 감속도를 결정하여야 한다. 이를 위해 두 편성 열차운행시의 기본적인 알고리즘을 개발하였으며, 이를 다편성 열차 운행시에도 적용할 수 있도록 확장시켰다. 현재까지는 단순히 알고리즘의 개발에만 그쳤으나 이러한 알고리즘의 성능을 테스트하기 위한 시뮬레이션을 수행하여야 한다.

[참고 문헌]

- [1] Aoki, M., H. Fujii, Y. Ishii & H. Wakata, "Applications of Inter-Vehicle Communication & their Effects for Road Traffic Improvement", Proceedings of the 26th International Symposium on Automotive Technology and Automation, pp. 761-768, 1993
- [2] Kawai, M., "Collision Avoidance Technologies", Proceedings of the 1994 International Congress on Transportation Electronics, pp. 305-316, 1994
- [3] 백동현, "통신을 이용한 열차제어시스템에서의 간격제어를 위한 알고리즘 개발", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 412-414p, 2003