

통신기반 열차제어시스템에서의 충돌회피를 위한 알고리즘 개발

The Development of Algorithm for Collision Avoiding in Communication Based Train Control System

백종현* 류상환** 김종기* 윤용기** 조봉관**
Baek, Jong-Hyen Ryu, Sang-Hwan Kim, Jong-Ki Yoon, Yong-Ki Cho, Bong-Kwan

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. 서 론

통신기반 열차제어시스템의 차상장치는 노선에서 운행되는 모든 열차에 설치되어 있으며, 이러한 차량이 선로를 따라 운행할 때 열차 안전운행에 필요한 여러 가지의 데이터들이 다른 인접한 열차 또는 지상장치와의 통신을 통하여 송수신될 것이다. 열차에 설치된 각각의 차상장치는 인접한 열차의 위치, 속도, 가속도 등의 정보를 통신을 통하여 지속적으로 알 수 있기 때문에 선행열차와의 충돌을 피하기 위한 감속도 값이 결정될 수 있다. 이러한 감속도는 선행열차와의 충돌뿐만 아니라 뒤따라오는 열차를 포함한 여러 열차의 연쇄적인 충돌을 피하기 위해 고려되어야 한다.

본 논문에서 개발된 알고리즘은 선행열차와의 충돌을 피하기 위해 열차 V_i 에서 요구되는 감속도를 산출하는 것에서부터 시작하였다. 이것은 선행열차와 충돌을 피하기 위해 열차가 어떻게 동작하여야 하는지를 결정하기 위함이다. 이를 위해서는 선행열차가 그 것의 선행열차와의 충돌을 피하기 위한 동작을 고려하여야 한다. 이에 대한 개요는 그림 1에서 보여주고 있다. 주어진 시간에서 열차 V_i 는 선로를 따라 운행되는 거리 $s_i(t)$, 속도 $v_i(t)$, 만약 열차가 속도가 늘어나면 양수이고, 속도를 줄이면 음수인 가속도 $a_i(t)$ 에 의해 특성이 부여된다. 열차 V_1 과 V_2 사이의 충돌을 피하기 위해서는 V_1 이 운행되는 거리는 항상 V_2 가 운행되는 거리보다 적거나 같아야 한다. 즉, $s_1(t) \leq s_2(t)$ 이어야 한다.

이것을 그림으로 표현한 것이 그림 2이다. 그림 2에서는 가속도가 없는 두 편성의 열차를 보여주고 있다. 시간이 0인 수직축에서 다르게 표시된 선행열차 V_1 과 후행열차 V_2 는 두 개의 직선으로 표현되고 있으며 후행열차가 선행열차보다 더 큰 속도(기울기)를 가지고 있으므로 이 직선들은 충돌지점에서 교차한다.

* 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

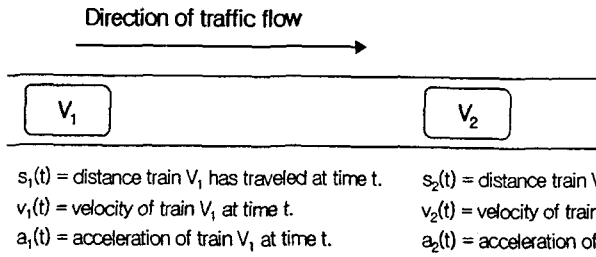


그림 1. 두 편성의 열차운행

그림 3에서는 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 계속되어지는 시간 e 까지 계속된다. 앞의 설명은 그림을 단순하게 하기 위해 실제로 동작하는 것을 간략화 한 것이다. 실제의 열차운행에서는 시간 0 과 b 사이에서, 그리고 시간 e 이후에는 다른 비율로서 가속 또는 감속되기 때문이다. 따라서 본 논문에서 개발된 알고리즘에서는 시간 0 과 b 사이에서, 그리고 시간 e 이후에 가속 또는 감속되고 있다는 것을 고려하였다. 두 편성의 열차를 고려할 때, 본 논문에서 추구하는 것은 선행열차가 보다 앞서있는 다른 열차와의 상황을 고려하여 감속 또는 가속할 때, 후행열차가 어떻게 동작되어야 하는지를 결정하는 것이다.

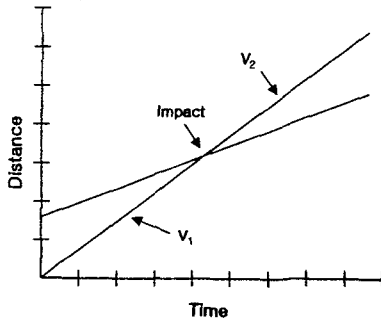


그림 2. 가속이 없는 두 편성의 열차

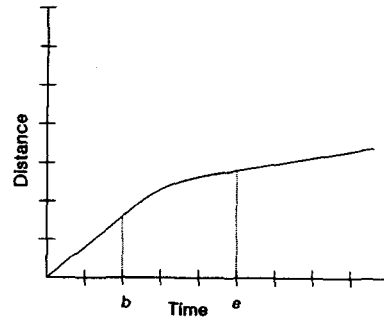


그림 3. 감속되는 한 편성의 열차

2. 두 편성의 열차운행시의 감속도 계산

선행열차와의 충돌을 피하기 위해 필요한 후행열차의 감속도를 결정하기 위해서는 후행열차 시스템의 반응 및 동작시간이 고려되어야 한다. 따라서 후행열차는 재료가 아닌 작용 시간을 가지기 때문에, 두 가지 경우를 생각해볼 수 있다. 첫 번째로, 선행열차의 급격한 감속으로 인하여 후행열차가 감속하기 전에 선행열차와 충돌하는 것이다. 다른 경우는, 후행열차가 선행열차와의 충돌에 앞서 반응할 수 있으며, 충분한 제동력으로 충돌을 피할 수 있다는 것이다. 본 논문에서는 이러한 두 가지 경우에 대해 자세하게 검토하였다.

2.1 후행열차의 반응시간 전에 발생하는 충돌

이 경우에서의 열차간 충돌은 후행열차가 감속하기 전에 일어난다. 이러한 경우는 거의 없을 것이지만, 만약 이러한 충돌이 피할 수 없는 경우라면, 충돌시점에서 속도의 차이를 적게 함으로써 충돌에 의한 충격을 경감시키는 것이 바람직할 것이다.

이러한 경우를 위해 그림 4의 a~c까지는 세 가지 가능한 충돌 시나리오를 보여주고 있다. 그림 4의 a는 후행열차가 선행열차를 따라 잡았기 때문에 충돌이 발생하는 단순한 경우이다. 그림 4의 b에서는 V₂가 보다 앞서 있는 열차와의 충돌을 피하기 위해 감속하는 동안 V₁이 V₂와 충돌한다. 그림 4의 c에서는 V₂

가 앞서 있는 열차에 대한 충돌 회피 동작을 끝냈을 때, V_1 이 V_2 와 충돌한다.

여기에서 선행열차 V_2 가 그림 3과 같이 운행된다고 가정하면, V_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.

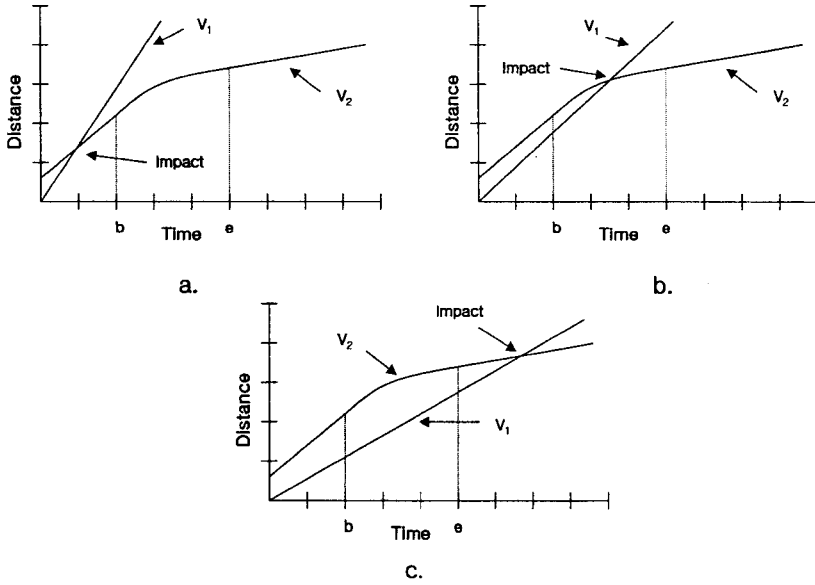


그림 4. 후행열차 가속 전에 일어나는 충돌에 대한 세 가지 시나리오

a. 선행열차가 가속하기 전의 충돌, b. 선행열차가 가속하는 동안의 충돌, c. 선행열차가 가속한 후의 충돌

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

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

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

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

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

위의 경우와 비슷하게 시간 t 의 함수로서 V_1 의 속도와 위치는 식 (6)과 (7)과 같이 표현될 수 있다.

$$v_1(t) = v_1(0) + a_1(0) \cdot t \quad \text{----- (6)}$$

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

열차가 가속하기 전에 충돌이 일어나기 때문에, 충돌을 돌이킬 수 없지만, 충돌시 속도의 차이와 충돌시간은 결정되어 질 수 있다. L_2 가 열차 V_2 의 길이라면, $s_2(t_i) - s_1(t_i) = L_2$, 일 때, 시간 t_i ; 일 때 충돌

들이 일어난다. 여기에서 L_2 는 열차 사이에서 절대적으로 유지되어야 하는 설계 간격을 포함하기 위해 증가되어 질 수 있으며, 위치 데이터에서 예상되는 오차를 고려하여야 한다.

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

$$[s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (t_i - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (t_i - \tau_2)^2] - \frac{[s_1(0) + v_1(0) \cdot t_i + \frac{1}{2} a_1(0) \cdot t_i^2]}{-----} = L_2 \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} [a_2(\tau_2) + a_1(0)] \cdot t_i^2 + [v_2(\tau_2) - a_2(\tau_2) \cdot \tau_2 + v_1(0)] \cdot t_i + \frac{[s_2(\tau_2) - v_2(\tau_2) \cdot \tau_2 + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot \tau_2^2 - s_1(0) - L_2]}{-----} = 0 \quad (9)$$

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 $\tau_2=0$ 라고 한다면, 시간 0과 b_2 사이에서 충돌이 일어난다고 가정할 수 있다. 만약 식 (9)로부터 t_i 에 대한 해가 시간 0과 b_2 사이에 있다면, 충돌은 t_i 의 계산된 값에서 발생할 것이다. 그리고 충돌시 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, 충돌이 일어난다면, 그 충돌은 시간 b_2 후에 일어날 것이다. $\tau_2 = b_2$ 라고 하면, 충돌은 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. 만약 얻어진 t_i 의 해가 b_2 와 e_2 사이에 있다면, 충돌시의 속도 차이는 위에서 설명한 것과 같이 구할 수 있을 것이다. 만약 그 사이에 없다면, 충돌은 시간 e_2 이후에 발생한 것으로 가정할 수 있다. 그렇다면 $\tau_2 = e_2$ 라고 놓고 위의 과정을 반복하여야 한다.

2.2 후행열차의 반응시간 후에 필요한 감속

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

선행열차와 후행열차의 거리가 아무리 가깝더라도 후행열차의 속도가 선행열차의 속도와 같거나 작다면 충돌은 발생하지 않을 것이다. 다시 말하면, 선행열차 V_2 의 길이가 $s_2(t_i) - s_1(t_i) = L_2$ 일 때 만약 $v_1(t) \leq v_2(t)$ 이면 충돌은 발생하지 않는다. 이것은 다음의 식 (10)과 같다.

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

선행열차는 또한 보다 앞에 있는 다른 열차에 반응하여 감속할 수도 있는데, 이에 대해 그림 5의 a~c에서 보여지는 것처럼 세 가지의 가능한 충돌 회피 시나리오가 있다. 각각의 경우에서 식 (10)의 조건은 두 개의 곡선이 교차할 때 충족된다.

그림 5의 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 5의 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 V_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.

$$v_2(t) = v_2(\tau_2) + a_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2) \quad \text{-----} \quad (11)$$

$$s_2(t) = s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (t - \tau_2)^2 \quad \text{----- (12)}$$

$$\text{여기에서, } \tau_2 = \begin{cases} 0, & t \leq b_2 \\ b_2, & b_2 < t \leq e_2 \\ e_2, & t > e_2 \end{cases} \quad \text{----- (13)}$$

이러한 경우에, 후행열차 V_1 는 선행열차와의 충돌을 피하기 위해 제동장치를 동작시킬 것이므로, 시간 t 의 함수인 후행열차 V_1 의 속도와 위치는 $t > b_1$ 일 때, 식 (14)와 (15)에 의해 얻을 수 있다.

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

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

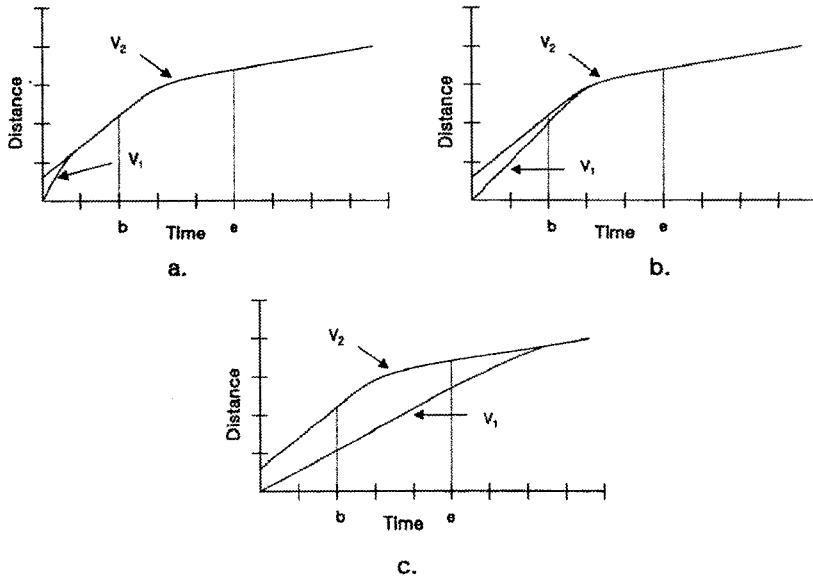


그림 5. 세 가지의 가능한 충돌 회피 시나리오 : a. 선행열차가 감속하기 전의 충돌 회피, b. 선행열차가 감속하는 동안의 충돌회피, c. 선행열차가 감속한 후의 충돌회피

시간 b_1 에서 감속을 시작할 때, 후행열차 V_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.

$$a_1(b_1) = \frac{-[v_2(\tau_2) + a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) - v_1(b_1)]^2}{2 \cdot [s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2)^2 - s_1(b_1) - L_2]} + a_2(\tau_2) \quad \text{----- (16)}$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot [s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2)^2 - s_1(b_1) - L_2]}{v_2(\tau_2) + a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) - v_1(b_1)} + b_1 \quad \text{----- (17)}$$

그리고, 열차 V_1 과 V_2 사이의 속도와 거리의 차이를 각각 ΔV_{12} 와 ΔS_{12} 라고 정의하면,

$$\Delta V_{12}(\tau_2) = v_2(\tau_2) + a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) - v_1(b_1) \quad \text{----- (18)}$$

$$\Delta S_{12}(\tau_2) = s_2(\tau_2) + v_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2) + \frac{1}{2} a_2(\tau_2) \cdot (b_1 - \tau_2)^2 - s_1(b_1) - L_2 \quad \text{----- (19)}$$

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

$$a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(\tau_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(\tau_2)} + a_2(\tau_2) \text{-----} (20)$$

$$e_1 = \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(\tau_2)}{\Delta V_{12}(\tau_2)} + b_1 \text{-----} (21)$$

3. 개발된 알고리즘

후행열차가 선행열차와의 충돌을 피하기 위해 본 논문에서 개발된 알고리즘은 $a_1(b_1)$, e_1 , $a_1(e_1)$ 을 결정하기 위한 절차로서, 그림 6과 같이 pseudo-프로그래밍으로 보여주고 있다. 이 프로그램의 성분은 선행열차를 위한 거리-시간 파라미터 성분($s_2(0)$, $v_2(0)$, $a_2(0)$, b_2 , $a_2(b_2)$, e_2 , $a_2(e_2)$), 선행열차의 길이 L_2 , 그리고 후행열차의 현재 상태($s_1(0)$, $v_1(0)$, $a_1(0)$, b_1) 등이다.

$$\text{if } \left(0 \leq \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(0)}{\Delta V_{12}(0)} + b_1 \leq b_2 \right) \text{ then } a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(0)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(0)} + a_2(0);$$

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

$$\text{else if } \left(b_2 < \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(b_2)}{\Delta V_{12}(b_2)} + b_1 \leq e_2 \right) \text{ then } a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(b_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(b_2)} + a_2(b_2);$$

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

$$\text{else if } \left(e_2 < \frac{-2 \cdot \Delta S_{12}(e_2)}{\Delta V_{12}(e_2)} + b_1 \right) \text{ then } a_1(b_1) = \frac{-[\Delta V_{12}(e_2)]^2}{2 \cdot \Delta S_{12}(e_2)} + a_2(e_2);$$

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

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

4. 결론

본 논문에서는 궤도회로가 없는 통신기반 열차제어시스템에서 여러 편성의 열차들의 충돌을 회피하기 위한 알고리즘을 고안하였다. 인접한 열차의 정보는 통신을 통하여 지속적으로 송수신되고 이에 선행열차와의 충돌을 피하기 위한 감속도를 결정하여야 한다. 이러한 감속도는 선행열차와의 충돌뿐만 아니라 뒤따라오는 열차를 포함한 여러 열차의 연쇄적인 충돌을 피하기 위해 고려되어야 한다. 본 논문에서는 첫 단계로 두 편성의 열차에 대해서만 고려하여 알고리즘을 개발하였다. 물론, 실제 운행에 있어서는 여러 편성의 열차들이 지속적으로 운행되고 있기 때문에 여러 편성의 열차들을 모두 고려하여야 할 것이다. 향후 이러한 부분에 대한 연구를 수행할 것이며, 또한 이러한 알고리즘의 성능을 테스트하기 위한 시뮬레이션을 수행할 것이다.

참고문헌

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. Tribe, R., R. Conlong & K. Prynne, "Collision Warning", Autotech '93, pp. 19-21, 1989
4. Woll, J. D., "Radar Based Vehicle Collision Warning System", Proceedings of the 1994 International Congress on Transportation Electronics, pp. 293-298, 1994