

무선통신을 이용한 열차제어시스템의 안전제동모델에 대한 연구

백종현, 김용규
한국철도기술연구원

The Study of Safety Braking Model for Train Control System Using Wireless Communication

Baek, Jonghyen, Kim, Yongku
Korea Railroad Research Institute

Abstract - 기존 국내의 간선 철도와 도시철도에서는 궤도회로에 기반한 고정폐색방식에 의한 열차제어시스템을 사용하고 있으나, 세계적인 추세가 유지보수 비용을 줄이고 선로 용량을 증가시킬 수 있는 무선통신을 이용한 이동폐색방식에 의한 새로운 통신기반 열차 제어 시스템(CBTC(Communication Based Train Control) system)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 도시철도의 경우 이에 대한 실용화가 이루어지고 있는 실정이다. 현재 국내에서도 한국철도공사에서는 분당선 구간에 CBTC 시스템의 시범적용을 진행하고 있으며, 또한 한국철도기술연구원에서도 건설교통부가 추진하고 있는 도시철도 표준화 사업의 한 분야로 도시철도 신호시스템에 대한 향후의 표준화 방향을 CBTC 시스템으로 설정하고, 이에 대한 표준화 및 국산화 연구개발이 진행되고 있다. 또한 유럽에서 진행되고 있는 ERTMS/ETCS 시스템의 레벨 2와 3에서는 앞의 방식하고는 다른 GSM-R의 무선방식을 사용하고 있지만 이 또한 무선통신에 의한 열차제어시스템을 적용하고 있다. 본 연구에서는 이러한 무선통신을 이용한 열차제어시스템에 있어서의 안전제동모델에 대해 연구하였으며 그 결과를 소개하고자 한다.

1. 서 론

무선통신 기반의 열차제어시스템에서 열차의 위치검지는 타코메터에 의한 속도 필스의 누적계산과 지상의 절대위치 표시지점에서의 보정을 통하여 정확도를 확보한다. 열차의 운행에 필요한 정보는 무선통신에 의해 정보를 전송하는 차상신호방식을 사용한다. 열차의 제어는 지상의 중앙 집중시스템으로부터 해당하는 선행 열차의 위치 및 속도를 전송 받아 현재 위치에서의 속도 및 가속도를 결정하는 방식으로 제어한다. 무선통신 기반의 열차제어시스템에서 필요한 데이터는 진행 중인 열차의 절대위치 및 속도, 현재 선로의 제한 속도, 다음 선로의 제한속도와 절대위치, 선행열차의 절대 위치와 속도이다. 가장 최우선시 되어야 할 제한 속도는 선행 열차가 존재하는 경우이며 선행 열차의 속도로부터 이동 권한 레벨이 정의된다.

후행 열차가 선행열차로부터 충분한 거리에 있고 다음 트랙으로부터 충분히 안전한 거리라면, 진행 중인 트랙의 제한속도와 열차의 최대속도 중 작은 쪽을 목표속도로 결정한다. 후행 열차가 선행열차로부터 충분한 거리에 있고 현재 속도가 다음트랙의 제한 속도보다 크고 충분히 안전한 거리가 아니라면, 목표를 다음트랙의 제한 속도로 변경한다. 선행 열차로부터 충분한 거리가 아닌 경우 목표 속도를 선행열차속도, 열차의 최대속도, 현재 트랙의 제한 속도, 다음트랙의 제한 속도 중 가장 작은 값으로 변경한다.

목표 속도를 결정하기 위해선 현재 열차의 위치가 선

행 열차로부터 안전한 위치인지, 다음 트랙으로부터 충분히 안전한 위치인지를 결정해야 한다. 무선통신 기반의 열차제어시스템에서는 그러한 결정의 근거로 안전거리 제동모델이 사용된다.

2. 본 론

본 연구에서는 안전 제동 모델을 설정하기 위하여 다음과 같은 안전 운행 계획을 먼저 수립하였다.

- 열차는 진행 중인 선로의 제한 속도를 넘어서 안 된다.
- 열차는 다음 진행 할 선로에 진입하기 전에 다음 선로의 제한 속도까지 감속하여야 한다.
- 선행 열차의 적색구간은 침범해서는 안 된다.

따라서 선행 열차의 속도에 따라서 절대 침범해서는 안 되는 적색구역, 감속을 하는 황색 구역, 영향을 받지 않는 청색구역을 정하고 열차는 해당되는 구역에 따라 동작하게 된다. 안전제동모델의 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 안전제동 정보가 저장된다. 이를 위해 다음과 같은 변수들이 정의된다. 먼저 감시 제동 거리 S_{spv} 는 ATP 장치에 의해 감시되었을 때, 목표지점에 대한 상용 제동 거리이며, S_{spv} 에 대해서 황색 폐색 최소 길이를 계산하는데 사용되는 최대 감시 제동거리는 $S_{spv,y}$ 라고 정의할 수 있다. 또한 적색 폐색 최소 길이를 계산하는데 사용되는 최소 감시 제동거리는 $S_{spv,r}$ 로 정의한다.

안전제동을 위한 최소거리는 최악의 경우에 발생할 수 있는 열차의 최대 비상정지 거리를 기준으로 설정되며, 이러한 제동의 종류 및 작동순서는 다음의 그림 1과 같다.

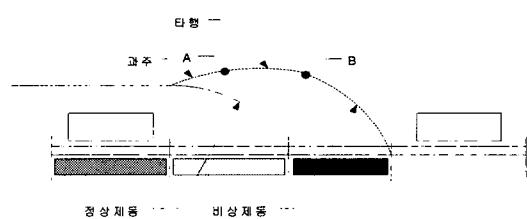


그림 1. 제동작동 순서

- 정상제동 : 상용 제동을 작동하여 황색 이동 권한 내에 정지(실선 곡선)
- 비상 제동 : 최대 출력 추진 상태로 가속 중에 오동작이 발생했을 때에도, 최소 보장 비상 제동률

로 열차가 적색 이동 권한 내에 정지(점선 곡선) 적색 폐색 길이 계산에 기초하여 사용된 최악의 열차 장애는 최소 보장 제동율에서의 비상 제동에 의한 최대 추진 출력 장애이다. 이러한 최대 추진 출력 장애가 발생하였을 경우, 다음과 같은 단계에 의해 열차가 이동한 거리가 안전제동 거리라 할 수 있다.

- 열차는 최대 추진 출력 장애로 인하여 선로에 현재 위치한 허가된 최대 속도로 가속한다.
- 열차 속력이 속도제한 허용오차와 같은 값에 의해 최대 허가 속도를 초과 할 때, 자동 열차 보호 시스템은 추진 장치를 차단하고 비상 제동 적용 명령에 의해 반응한다.
- 추진력이 소모될 때(시스템 반응 시간이 포함된 지연시간, 텔레이 반응시간 및 비상제동 작용시간)까지 열차는 가속을 계속한다.
- 비상제동이 최대 적용될 때까지 열차는 타행한다.
- 최소 보장 비상 제동율에서 열차는 비상 제동에 의해 정지한다.

2.1 안전제동 고려사항

차상장치에서 열차의 속도 프로파일을 산정하여 안전제동 거리를 확보한 경우에 고려하여야 하는 사항은 다음과 같다.

- 열차 위치 검지의 허용 오차
- 열차 길이
- 허용 초과 속도
- 열차 속도 검지 오류
- 시스템 반응 시간 및 지연 시간
- 최악의 조건에서 과속도 검지에 대한 비상 제동의 최대 반응
- 비상 제동의 감속율
- 선로의 구배 및 곡선 반경

차상장치의 운영 데이터베이스에는 각 폐색 구간의 조건에 따라 다른 안전 제동거리 정보가 저장된다.

2.2 폐색길이 파라미터

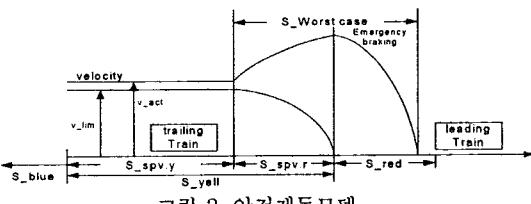


그림 2. 안전제동모델

표 1. 안전제동모델 파라미터

파라미터	변수	설정 값
속도 제한 강제 오차(V_{tol})	V_{tol}	1.0 m/s
속도 측정 불확실성(e_v)	e_v	$\pm 5\%$
감시 제동율(a_{spv})	a_{spv}	-3.5 km/h/s(0.97 m/s) grade compensated.
목표속도(v_{targ})	v_{targ}	0 Km/h
최대 저크(jerk) 비율	jerk	0.8 m/s ³
속도 제한(V_{lim})	V_{lim}	ATO가 열차 이동을 허용한 곳에서의 최고 속도

(1) 속도 제한(V_{lim}) : V_{lim} 은 ATO가 열차 이동을 허용한 곳에서의 최고 속도로 정의하며, 이러한 속도제한은 다음의 3가지 경우와 같이 발생된다.

- 선로 위의 열차 현재 위치에서 허용된 최고 속도
- 열차가 속도 제한에 접근할 때의 최대 허용속도

제동곡선은 ATP 서비스시스템에 의해 바이탈적으로 속도 제한과 강제로 교차한다.

- 열차가 속도 제한 이하로 이동할 때의 최대 가능 속도. 속도를 줄일 때까지 열차는 고속도로 가속하지 않는다. 이경우의 속도 변화율은 최대 열차 가속도로 제한한다.

(2) 속도 제한 강제 오차(V_{tol}) : V_{tol} 은 차상 열차제어시스템의 측정 속도가 과속 조건에서 ATP 동작 없이 V_{lim} 을 초과한 것에 대한 차이이다. 최대 추진 출력 장애가 발생하였을 때, 열차의 감속을 위한 추진 차단 및 비상 제동이 작동하는 짧은 시간 동안 열차 속도는 $V_{tol} + V_{lim}$ 을 초과 할 수 있다.

(3) 속도 측정 불확실성(e_v) : e_v 는 실제 속도가 측정 속도를 초과할 수 있는 것에 대한 최대 비율이다. 열차 위치 측정을 위한 타코미터가 연속된 트랜스폰더 위치 간의 5% 이내가 되도록 ATP는 감시한다. 이 값은 타코미터의 속도 측정 오차가 최악의 경우 $\pm 5\%$ 이하가 되도록 한다.

(4) 감시 제동율(a_{spv}) : a_{spv} 는 ATP에 의해 감시되는 상용제동에 대한 열차의 감속율(dv/dt)이다. 열차의 상용제동률은 차상 열차제어시스템에 의해 제어되고, 종축 가속도는 구배 횡단을 고려하지 않는다면 3.5Km/h/s(0.97m/s²)를 초과하지 않는다. 감시 제동률은 구배 또는 후부바람 유발 가속도에 대해 보상된다. 10%의 점착값(adhesion value)은 감시 제동률을 정의하는데 고려된다.

(5) 목표속도(v_{targ}) : v_{targ} 는 황색 정지 지역의 끝을 지나서 통과하지 않을 때의 속도이다. 폐색경계 계산에 대해서는 일반적으로 0Km/h/s로 한다.

(6) 최대 저크(jerk) 비율 : 가속도 변화의 최대 비율인 저크는 0.8m/s³로 제한된다.

2.3 공식 및 파생변수

(1) 최대 측정 속도(V_{mes}) : V_{mes} 는 과속에서 ATP 기능 수행과 관계없이 타코미터에 의해 보고 되어야 하는 최대 속도이며 다음의 식과 같이 연산된다.

$$V_{mes} = V_{lim} + V$$

(2) 최대 실제 속도(V_{act}) : V_{act} 는 ATP 기능 수행과 관계없이 열차가 운행되어질 수 있는 최대 실제 속도이며 다음과 식과 같이 연산된다.

$$V_{act} = V_{mes} (1 + e_v)$$

(3) 감시 제동 거리(S_{spv}) : S_{spv} 는 ATP에 의해 감시되었을 때, 목표지점에 대한 상용 제동 거리이다. 이러한 감시제동 거리는 다음과 같은 두 가지의 값이 있다.

- 황색 폐색의 최소길이를 계산하는데 사용되는 최대 감시 제동거리($S_{spv,y}$)
- 적색 폐색의 최소길이를 계산하는데 사용되는 최소 감시 제동거리($S_{spv,r}$)

(4) 최대 감시 제동거리($S_{spv,y}$) : $S_{spv,y}$ 는 다음과 같이 4 가지 요소의 합으로 연산된다.

- 최대 속도에서 상용제동 지연(0.9sec)동안의 이동 거리
- 제동으로 인한 저크
- 100% 제동상태에서의 정지거리
- 정지에 대한 제동 저크 출력

전체 최대 감시 제동거리는 다음과 같이 연산되며, 기울기와 관련된 모든 연산은 유사 불연속 선형 기울기의 범위 합산을 사용한다.

$$S_{spv,y} = jerk_{in} \cdot \sum_{extant=1}^{extant=n} \left[\frac{1}{2} \frac{v_{enter}^2 - v_{out}^2}{-a_{spv}} \right] + jerk_{out} + v_{enter} T_{SB}$$

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

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

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

(5) 최소 감시 제동거리($S_{spv,r}$) : 전체 최소 감시 제동 거리는 다음과 같이 연산된다.

$$S_{spv,r} = \sum_{exten=1}^{exten=n} \left[\frac{1}{2} \frac{v_{enter}^2}{2 - a_{spv}} \right] \quad (v_{enter} = v_{limit})$$

(6) 최소 황색 폐색 길이(S_{vel}) : S_{vel} 는 폐색의 끝에서 감시제동을 어기지 않고 상용 정지를 할 수 있도록 하기 위하여 황색 폐색에 대해 요구된 최소 길이이다. S_{vel} 는 다음과 같이 연산된다. $S_{spv,y}$ 는 황색 벡터의 길이이며, $S_{err,rear}$ 는 연결된 가상 폐색 경계로부터 황색 벡터의 시작까지의 거리이다. 본 연구에서는 연산의 편리를 위하여 $S_{err,rear}$ 를 항상 최대값인 5m로 설정하였다.

$$S_{vel} = S_{spv,y} + S_{err,rear}$$

(7) 후부바람(tail wind)로 인한 가속(a_{tail}) : a_{tail} 은 후부바람에 의해 열차에 가해지는 최대 가속이다. 이 값의 산출되는 기준의 차량제작사에서 사용하고 있는 수식을 사용하였으며, 열차 속도와 풍속에 관한 함수로 이루어진다. 제동거리 연산을 하는 각 단계마다 바람의 효과가 다음과 같은 공식에 따라 연산되어 적용된다.

$$a_{tail} = \frac{0.6 * (C_F + C_S * (Number_{vehicles} - 1)) * Area_{CrossSection_on} * (V_{train} - V_{tail})^2}{MASS_Train + ROT_Mass_Train}$$

C_F =열차의 첫번째 차량 위 전면 영역당 drag
= 0.3 [N/m² / (m/s)²]
 C_S =나머지 차량의 전면 영역당 표면 효과 drag
= 0.1 [N/m² / (m/s)²]
Area_Cross Section = 7 m²
Mass_train = 58426 kg
ROT_Mass_Train = 3746.9 kg

(8) 구배에 따른 가속(a_{gra}) : a_{gra} 는 선로로부터 발생하는 가속 성분이며, 다음과 같이 연산된다. 여기서 K_{gra} 는 수치로 구해진 선로 위치에서의 구배이며, g는 중력 가속도(9.80 m/s²)이다.

$$a_{gra} = g * \sin(\tan^{-1}(K_{gra}))$$

(9) 구배 영향 및 후부바람에 따른 파주 가속도(a_{max}) : a_{max} 는 구배와 후부 바람이 최악의 경우 추진 장애와 함께 고려될 때의 열차의 유효 가속도이며, 다음과 같이 연산된다.

$$a_{max} = a_{mot} + a_{gra} + a_{tail}$$

(10) 구배와 후부바람에 따른 타행(a_{coast}) : a_{coast} 는 구배와 후부바람이 고려될 때의 유효 가속도이며, 다음과 같이 연산된다.

$$a_{coast} = a_{gra} + a_{tail}$$

(11) 구배 영향 및 후부바람에 따른 비상제동(a_{EB}) : a_{EB} 는 구배와 후부바람이 최악의 경우일 때 비상 제동을 과 함께 고려되는 유효 감속도이며 다음과 같이 연산된다.

$$a_{EB} = a_{brake} + a_{gra} + a_{tail}$$

(12) 전체 파주 가속 시간(t_{acc}) : t_{acc} 는 모터가 비정상적으로 되기 전 적용된 공차 최대 추진 출력을 가하기 위한 최대시간이며, 다음과 같이 연산된다.

$$t_{acc} = t_{tot} + t_{rel} + t_{off}$$

(13) 제동을 시작하는 전체시간 (t_{toEB}) : t_{toEB} 는 파주의 시작부터 최대 비상제동까지의 전체 시간이며, 다음과 같이 연산된다.

$$t_{toEB} = t_{tot} + t_{rel} + t_{build}$$

(14) 전체 타행 시간(t_{coast}) : t_{coast} 는 모터 추진이 0에 도달하고 비상제동이 최대로 적용되는 순간의 시간이며, 다음과 같이 연산된다.

$$t_{coast} = t_{toEB} + t_{acc} = t_{build} - t_{off}$$

(15) 가속 후 속도(V_{acc}) : V_{acc} 는 열차가 파주 가속 기간의 끝에 도달하는 속도이며, 다음과 같이 연산된다.

$$V_{acc} = a_{max} * t_{acc} + V_{act}$$

(16) 가속동안의 이동 거리(S_{acc}) : S_{acc} 는 모터 추진이 0에 도달하는 순간과 과속의 사이에서 열차가 운행된 거리이다.

$$S_{acc} = \frac{1}{2} * a_{max} * t_{acc}^2 + V_{acc} * t_{acc}$$

(17) 타행 거리(S_{coast}) : S_{coast} 는 모터 추진이 0에 도달하는 순간과 비상제동이 최대로 적용되는 순간에 열차에 의해 운행된 거리이며, 다음과 같이 연산된다.

$$S_{coast} = \frac{1}{2} * a_{coast} * t_{coast}^2 + V_{acc} * t_{coast}$$

(18) 타행 후 속도(V_{coast}) : V_{coast} 는 구배로 인한 가속하는 타행 시간의 끝에서 열차의 속도이며, 다음과 같이 연산된다.

$$V_{coast} = a_{coast} * t_{coast} + V_{acc}$$

(19) 비상제동 시간(t_{EB}) : t_{EB} 는 비상제동이 최대로 적용되는 순간과 열차 속도가 V_f 에 도달하는 순간 사이에 열차가 운행한 거리이다. 비상제동 적용을 받는 열차의 감속률은 기울기의 함수이기 때문에 S 는 제동하는 동안 가로지른 각 범위에서 운행된 거리 합으로 연산된다.

$$t_{EB} = \begin{cases} 0, & V_{coast} \leq V_f \\ \frac{V_f - V_{coast}}{a_{EB}}, & V_{coast} > V_f \end{cases}$$

(20) 비상 제동 거리(S_{EB}) : S_{EB} 는 비상제동이 최대로 적용되는 순간과 열차가 정지하는 순간 사이에 열차가 운행한 거리이다. 비상제동 적용을 받는 열차의 감속률은 기울기의 함수이기 때문에 S_{EB} 는 제동하는 동안 가로지른 각 범위에서 제동 열차에 의해 운행된 거리의 합으로 연산된다.

$$S_{EB} = \sum_{exten=1}^{exten=n} \left(\frac{1}{2} * a_{EB} * t_{exten}^2 \right)$$

(21) 전체 정지거리(S) : S 는 파주로 시작되는 순간과 열차가 정지하는 순간까지 열차가 운행한 거리이다.

$$S$$

(22) 적색 벡터길이(S_{worst}) : S_{worst} 는 열차 앞에 위치해 있는 어떠한 장애물과도 최악의 경우에도 충돌 없이 열차를 정지할 수 있도록 요구되는 최소 전체 거리이며, 다음과 같은 2가지 형태가 있다.

- 장애물은 이동하는 물체로 Overshoot 폐색이 임박한 것으로 가정한다.

$$S_{worst} = S$$

- 장애물은 고정된 물체이다.

$$S_{worst} = S$$

(23) 최소 적색 폐색 길이(S_{red}) : S_{red} 는 선행 열차 또는 다른 장애물에 대한 충돌 없이 최악의 장애 하에서도 열차가 안전하게 정지하기 위하여 목표지점을 통과하기까지 요구되는 최소 거리이다. 열차가 목표지점(목표 지점으로부터 후면)에서 정지하기 위해 상용제동이 시작되는 순간에서 발생되는 최악 장애에 대하여 S 는 다음과 같이 연산된다.

$$S_{red} = S_{worst} - S_{spv,r}$$

적색 벡터 길이에 대하여, 목표지점은 열차 전면의 1번째 적색 PMA 폐색을 즉시 선행하는 황색 PMA에서의 마지막 정지지점으로 얻어진다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이재호외, “철도시스템 Smart 기술연구”, 한국철도기술연구원 기본사업 보고서, 2004년