

열차간 통신 기반 열차자율주행시스템을 위한 선로분기 알고리즘

오 세 찬*, 조 영 종*

Track Switching Algorithm for the T2T-Based Autonomous Train Control System

Sehchan Oh*, Young-Jong Cho*

요 약

본 논문은 열차간 통신기반 열차자율주행시스템을 위한 선로분기 알고리즘을 제안한다. 효율적인 선로분기를 위해 선로전환기와 분기기 특성을 반영한 최소한의 세마포어 영역을 선로분기구간으로 정의한다. 제안된 선로분기 알고리즘은 기존의 복잡한 연동논리를 사용하지 않는 대신 선로구간과 선로분기구간을 공유자원이면서 동시에 두 편성 이상의 열차가 점유하지 못하는 세마포어 영역으로 간주하고 이를 배타적으로 분배한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 선로분기 알고리즘의 성능을 기존 CBTC와 비교함으로써 향상된 분기제어가 가능함을 확인하였으며 다양한 분기기와 속도환경에서의 영향을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 열차자율주행을 위한 선로분기 알고리즘은 기존의 EI와 같은 지상제어서버와 복잡한 연동논리를 사용하지 않음으로써 성능향상은 물론 구축비용 절감효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

Key Words : Autonomous train control, track switching algorithm, train-to-train, track switching area, semaphore area

ABSTRACT

In this paper, we propose a track switching algorithm for the train-to-train communication-based autonomous system. For efficient track switching, the minimum semaphore area reflecting the track switch and point machine characteristics is defined as the track switching area. The proposed track switching algorithm does not use the existing complex interlocking logic any more, and distributes the track segment and track switching areas exclusively among trains by considering them as both shared resources and semaphore areas that cannot be occupied by two or more trains. Through simulation, we analyze the effects of various switching operations in various speed environments and show that the proposed algorithm performs better compared with the conventional CBTC. Since the proposed track switching algorithm for autonomous train system does not use complex interlocking logic, it can be expected to reduce the construction cost by eliminating the ground server like the existing EI while providing performance improvements.

* 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First Author : Korea Railroad Research Institute, Train control & Communication Research Team, soh@krii.re.kr, 정회원

* Ajou University, Computer Communications Lab. yjcho@ajou.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2017-10-290, Received October 1, 2017; Revised October 20, 2017; Accepted October 23, 2017

I. 서론

열차는 비록 정해진 선로를 따라 움직이지만 특수한 선로분기구간을 통하여 열차를 다른 선로로 이동시킴으로써 주행경로를 변경할 수 있다. 열차의 주행 경로 변경을 위해서는 선로의 교차점에 선로의 방향을 잡아주는 특수한 형태의 선로인 분기기(switch)와 이러한 분기기 방향을 변환시키는 선로전환기(PM: Point Machine)가 필요하다.

하지만 분기기구간으로 열차가 접근하거나 주행 중인 경우에 선로를 전환하는 것은 열차의 탈선 또는 충돌과 같은 사고와 직결되므로 안전 측 동작(fail-safe)을 원칙으로 수행되어야 하며 이를 위해 열차의 점유정보를 바탕으로 연동장치의 연동논리라 불리는 복잡한 채정(lock) 절차를 따른다¹⁴⁻⁹.

최근 통신 및 컴퓨터 기술의 발전으로 무선통신 기반 열차제어시스템(CBTC: Communication Based Train Control System) 적용이 확산되고 있다¹⁻³¹. 하지만 CBTC는 선로분기구간을 제외한 선로구간에 대한 안전한 분배에 국한하고 있으며 여전히 선로분기구간에 대한 안전한 분배는 연동장치(EI: Electronic Interlocking)에 의해서 수행되고 있다^{2,3,121}.

하지만 EI가 선로분기구간에 대한 안전한 배분을 위해 사용하는 연동논리는 기존의 궤도회로 기반의 열차제어시스템과 같이 궤도회로 구간에 해당하는 선로의 점유정보에 의해 이루어지므로 선로분기구간에 대한 배분의 효율성이 떨어진다. 선로구간의 효율적인 분배에 대한 연구는 꾸준히 지속되어왔지만 선로분기구간의 효율적인 분배에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다¹¹⁰⁻¹²¹. 제한된 선로에 가능한 많은 열차를 안전하게 투입하기 위해서는 선로구간 뿐만 아니라 선로분기구간에 대한 효율적인 배분이 필요하다.

본 논문은 열차 간 통신기반 열차자율주행시스템(ATCS: Autonomous Train Control System)을 위한 새로운 선로분기구간과 선로분기 알고리즘을 제안한다. 열차의 안전하면서도 효율적인 선로분기를 위해 분기기와 선로전환 특성을 고려한 새로운 분기기구간이면서 최소한의 세마포어 영역을 정의한다. 제안된 선로분기 알고리즘은 기존의 복잡한 연동논리를 사용하지 않는 대신 선로구간 뿐만 아니라 선로의 분기기구간을 공유자원이며 동시에 두 편성 이상의 열차가 점유하지 못하는 세마포어 영역으로 간주하고 이를 배타적으로 분배한다.

제안된 선로분기 알고리즘에 대한 성능분석을 위해 기존의 EI 연동논리를 이용하는 CBTC를 대상으로

다양한 형태의 선로분기구간 환경에서의 열차 운전시각 시뮬레이션 결과를 비교한다.

II. 기존 선로분기구간 분배방법

CBTC의 경우 간격제어를 위한 선로구간의 분배를 ZC(Zone Controller)가 수행하며 선로분기구간에 대한 배분과 선로의 안전한 분기제어는 EI에서 수행한다. 열차제어의 성능은 선로구간의 분배 뿐만 아니라 분기기구간에 대한 분배 효율에 의해서 영향을 받는다. 따라서 특정 구간의 효율저하는 전체 시스템 성능의 병목구간으로 작용하게 된다.

CBTC는 중앙의 ZC가 관할영역 내에 존재하는 열차에게 선로구간과 선로분기구간을 포함하는 이동권한을 제공한다. ZC가 생성하는 이동권한(MA: Movement Authority)의 거리한계는 아래 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{MA} = \min(D_{MSRE}, D_{LSR}, D_{SPZ}) \quad (1)$$

여기서 D_{MSRE} 는 선행열차의 위치계산의 불확실성을 고려한 열차의 안전한 후미 부, D_{LSR} 는 EI로부터 수신한 안전한 진로의 한계지점, D_{SPZ} 는 관제 AT(S: Automatic Train Supervision) 또는 EI에서 설정한 방호구간의 시점을 의미한다.

Fig. 1과 같이 선로구간 A, C와 분기기구간 B로 구성된 노선에 열차 T1이 주행 중인 경우 EI의 안전한 진로의 한계지점은 다음과 같은 선로분기 알고리즘을 따른다.

- i. 열차 T1은 MA X를 가지며 ZC로 자신의 위치를 전송한다.
- ii. ZC는 EI로 열차의 위치를 제공하며 EI는 열차가 분기기구간으로 진입하는 것을 인지한다.

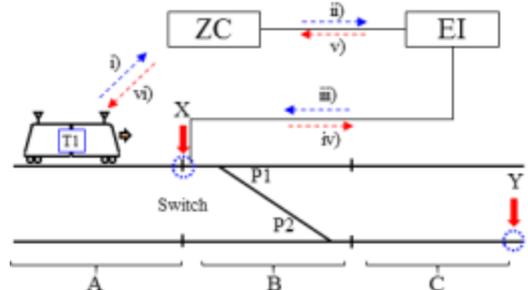


그림 1. CBTC의 분기알고리즘
Fig. 1. Switching algorithm of the CBTC

- iii. EI는 분기 케도구간 B에 타 열차가 존재하지 않는 경우에 한하여 B구간의 진입을 허용하고 선로전환기 P1과 P2 전환을 명령한다.
- iv. EI는 선로전환기 P1과 P2 모두 무결하게 전환 되어 있음을 확인한다.
- v. EI는 분기 케도구간 B를 포함한 새로운 진로의 한계를 ZC에 제공한다.
- vi. ZC는 진로의 한계를 반영한 새로운 MA Y를 T1 열차에 제공한다.

열차가 존재하지 않는 경우에 한하여 선로분기구간 진입을 허용하기 때문에 선로분기구간에 대한 분배효율이 저하된다.

III. 제안된 ATCS의 선로분기구간 분배방법

3.1 시스템 구성

열차자율주행시스템은 주행에 필요한 공유자원인 선로구간과 선로분기구간에 대한 배분을 열차가 담당한다. 시스템의 구성은 Fig. 2와 같이 Security Radio(SR), Autonomous Train Protection(ATP), Autonomous Train Operation (ATO), Odometer, Reader로 구성되는 차상장치와 SR, Resource Manager(RM)로 구성되는 지상설비로 구분할 수 있다.

SR은 열차간 통신과 열차와 지상설비간의 무선 통신을 지원한다. RM은 노선의 선로구간, 선로분기구간, PSD와 같은 공유자원에 대해 열차에 의한 점유현황을 기록하고 기록된 정보를 열차에게 제공한다. ATP는 선행열차의 정보와 RM를 참조하여 열차가 확보할 수 있는 공유자원을 계산하고 확보하며 확보된 자원 내에서 열차가 안전하게 주행하도록 방호한다. ATO는 ATP가 제한하는 거리와 속도제한 내에서 운전자 개입 없이 열차가 주행하도록 열차의 가감속을

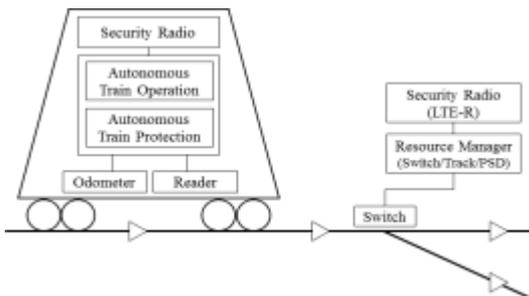


그림 2. ATCS의 시스템 구성
Fig. 2. System configuration of the ATCS

제어한다. Odometer와 Reader는 이동거리 계산과 거리보정을 위한 장치이다.

3.2 ATCS의 선로분기구간

ATCS의 선로분기구간(SA: Switching Area)은 최소한의 세마포어 영역이며 Fig. 3과 같이 정의할 수 있다. SA의 최소 세마포어 영역은 분기기 끝점(Point Blade) P_{PB} 부터 열차의 접촉한계점(Fouling Point) P_{FP} 를 양단의 선로에 투영한 점인 P_{RSFP} 와 P_{NSFP} 이다.

분기기 FP의 위치는 식(2)를 만족하는 지점이다.

$$a = \frac{1}{2}(D_{TW} + D_{CTR} + D_{DTR} + D_{ETR}) \quad (2)$$

여기서 D_{TW} 는 열차의 너비, D_{CTR} , D_{DTR} , D_{ETR} 는 각각 분기구간 내에서 열차의 횡방향 움직임을 고려한 중심 분기(central throw), 동적 분기(dynamic throw), 종단 분기(end throw)를 의미한다.

따라서 SA는 선로구간 $\overline{P_{PB}P_{RSFP}}$ 와 $\overline{P_{PB}P_{NSFP}}$ 로 표현할 수 있으며 식(3)과 같이 표현 할 수 있다. 정의된 SA는 반드시 한 대의 열차만 점유할 수 있도록 RM에서 세마포어 영역으로 관리하게 된다.

$$\begin{aligned} D_{SWA} &= \overline{P_{PB}P_{RSFP}} \approx \overline{P_{PB}P_{NSFP}} \\ &= D_{SL} + D_{FP} \\ &= D_{SL} + \frac{(a - \frac{D_{TRW}}{2})}{\tan(\frac{A_{FROG}}{2})} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 D_{SL} 은 분기기의 길이, D_{FP} 는 분기교차점에서 P_{RSFP} 또는 P_{NSFP} 까지 길이, D_{TRW} 는 선로의 폭, A_{FROG} 는 분기기의 각도(Switch Angle)를 의미한다.

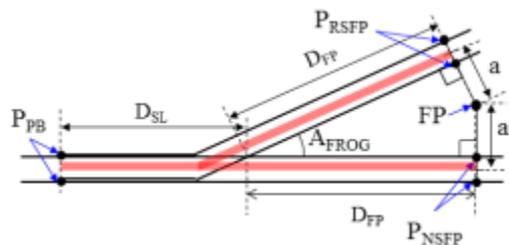


그림 3. ATCS의 선로분기구간
Fig. 3. Switching area of the ATCS

선로의 분기는 다양한 형태의 노선을 구성할 수 있다. 철도 선로에는 사전에 정의된 선로방향(방향)이 존재하며 본 절에서는 우측 방향을 순방향(nominal) 방향으로, 좌측 방향을 역방향(reverse) 방향으로 정의한다. ATCS의 SA는 다음과 같이 6가지 항목의 벡터로 표현이 가능하다.

[switch ID, reference TAG ID, nominal/reverse direction, length of start point, length of reverse switch direction, length of normal switch direction]

Fig. 4(a)는 단일 선로전환기로 구성된 분기형태이다. 선로전환기의 P1의 동작에 따라 진로는 $S \leftarrow P1 \leftarrow Y$ 또는 $S \leftarrow P1 \leftarrow Z$ 방향으로 생성될 수 있다. 진로 $S \leftarrow P1 \leftarrow Y$ 를 역방향(reverse) 분기, 진로 $S \leftarrow P1 \leftarrow Z$ 를 순방향(normal) 분기라 한다. SA1은 [P1, TAG #K, 순방향 a, b, c]로 표현할 수 있다. SA1의 순방향과 역방향의 진로는 각각 $a \leftarrow P1 \leftarrow c$, $a \leftarrow P1 \leftarrow b$ 로 정의할 수 있다.

Fig. 4(b)의 경우 두 대의 선로전환기로 구성된 분기형태이다. ATCS의 분기 제어는 노선의 형태와는 독립적으로 구성이 가능하다. 즉, 선로전환기 P1이 순방향(역방향)인 경우 P2는 순방향 또는 역방향을 가질 수 있다. SA2는 [P2, TAG #L, reverse, c, d, e]와 같이 표현할 수 있다. SA2의 순방향과 역방향 진로는 각각 $c \leftarrow P2 \leftarrow e$, $c \leftarrow P2 \leftarrow d$ 이다.

3.3 ATCS의 선로분기 알고리즘

ATCS의 SA는 최소한의 세마포어 영역으로서 반드시 하나의 열차에 할당되어야 한다. Fig. 5에서와 같은 회차(turn-back) 상황에서 열차 T1은 platform B에서 출발 후 방향을 변경하여 $Z \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow S$ 로 운행을 준비 중이며 T2는 $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$ 방향으로 운행을 하여 platform A로 정차를 준비 중인 경우에 대한 ATCS의 선로분기 알고리즘은 다음과 같다.

- i. 열차 T2는 RM을 통해 $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$ 진로를 주행하기 위해 필요한 자원현황을 확인한다. 이후 선로구간 D, B, F와 ATCS 선로분기구간 SA1, SA2를 확보하고 선로전환기 P1, P2의 제어명령을 전송한다.
- ii. RM은 열차 T2의 전환명령을 수신하여 선로전환기 P1, P2를 역방향으로 전환한다.
- iii. RM은 열차 T2로 리소스 점유현황과 함께 선로전환기 전환이 완료되었음을 전송한다.

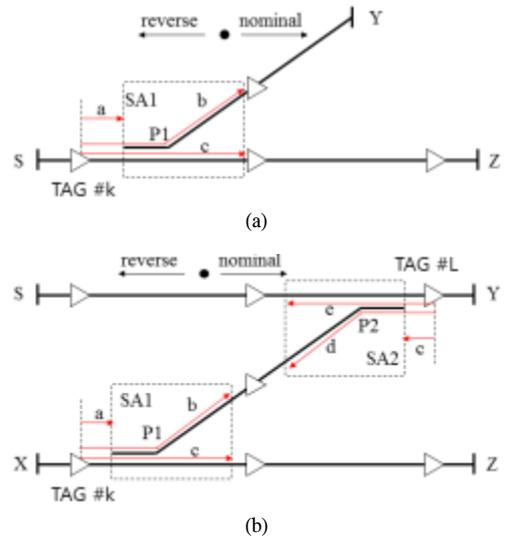


그림 4. 분기의 종류와 선로분기구간, (a) 단일 분기, (b) 쌍동 분기
Fig. 4. Type of switches and switching area, (a) single switch, (b) twin switch

- iv. 열차 T2는 $X \rightarrow P1 \rightarrow P2 \rightarrow Y$ 로 주행한다.
- v. 열차 T1은 RM을 통해 $Z \rightarrow P3 \rightarrow P4 \rightarrow S$ 진로를 주행하기 위해 필요한 공유자원 현황을 확인하고 ATCS 선로분기구간 SA3, SA4와 선로구간 A, C를 자신의 소유로 RM에 기록한다. 이후 열차 T1은 확보된 선로전환기 P3, P4에 대한 역방향전환 명령을 RM에 전송한다.
- vi. RM은 열차 T1의 전환명령을 수신하여 선로전환기 P3, P4를 역방향으로 전환한다.
- vii. RM은 열차 T1로 리소스 점유현황과 함께 선로전환기 전환이 완료되었음을 전송한다.
- iv. 열차 T1은 확보된 리소스를 이용하여 SA3의 종점까지 주행 후 선로교차구간 B를 열차 T2가 반환 할 때까지 대기한다.
- ix. 열차 T1은 선로교차구간 B가 열차 T2에 의해서 반환되었음을 확인하고 선로교차구간 B를 확보한다.
- x. RM은 열차 T1으로 리소스 점유현황과 함께 선로교차구간 B가 정상적으로 확보되었음을 전송한다.
- xi. 열차 T2는 선로교차구간 B로부터 S지점까지 주행한다.

위에서 언급한 ATCS 선로분기 알고리즘을 토대로 기존 CBTC를 대상으로 분기(junction)와 회차 상황에서의 운전시격을 비교분석한다.

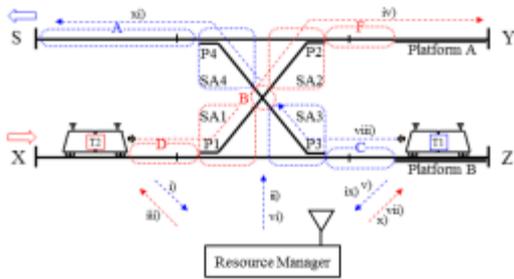


그림 5. ATCS의 분기구간 자원분배
Fig. 5. Resource distribution of track switching area in ATCS

분기상황은 하나의 선로가 두 개로 분기하는 상황을 의미한다. Fig. 6과 같이 같은 속도로 주행 중인 두 대의 열차 T1과 T2가 선로분기를 앞두고 있다. 열차 T1과 T2는 최소운행간격으로 주행 중이며 두 열차 모두 X→Y 방향의 진로를 가진다. ATCS는 선행열차의 속도에 기반한 간격제어를 수행하므로 CBTC에 비해 높은 간격제어 효율을 갖는다¹²⁻¹⁴. 하지만 본 절에서는 분기알고리즘 성능에 대한 비교를 위해 CBTC와 ATCS 열차 모두 동일한 최소운행간격을 갖는다고 가정한다.

CBTC의 경우 열차 T1이 분기의 궤도구간 D_{TRL} 을 진입하는 순간부터 열차 T1의 후미부가 완전히 분기 궤도구간을 빠져나올 때까지 열차 T2는 분기 궤도구간을 진입할 수가 없기 때문에 제동을 수행한다. 열차 T1이 분기 궤도구간을 완전히 빠져나오게 되면 비로소 열차 T2는 분기 궤도구간 진입이 가능하다.

반면 ATCS의 경우 열차 T1이 세마포어 영역인 SA1에 진입 후 열차 T1의 후미부가 SA1을 완전히 빠져나올 때까지만 감속을 수행한다. 분기기의 종류에 따라 SA1의 영역은 변경될 수 있지만 그럼에도 불구하고 분기 궤도구간보다 SA1이 작은 세마포어 영역을 가지게 된다. 열차 T1과 T2의 최소간격은 열차 T2의 최악의(worst-case) 제동모델에 기반해 결정한다. 즉, T2 열차의 후미 부를 절대 넘지 않도록 열차의 GEBR(Guaranteed Emergency Braking Rate) 출력

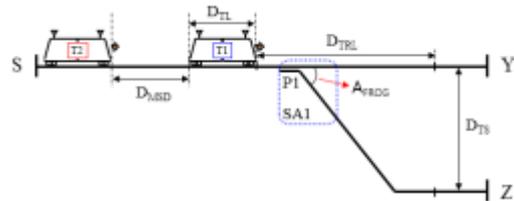


그림 6. 분기를 위한 선로 레이아웃
Fig. 6. Track layout for junction

전까지 최대 가속이후 감속을 수행한다.

열차 최소간격은 다음 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{MSD} = \frac{(V_{T2} + V_e + a_{T2} T_{eGEBR})^2 - (V_{T2} + V_e)^2}{2a_{T2}} + \frac{(V_{T2} + V_e + a_{T2} T_{eGEBR})^2}{2GEBR_{T2}} + D_{PU} \quad (4)$$

여기서 V_{T2} 는 열차 T2의 현재속도, V_e 는 속도계 오차, a_{T2} 는 열차 T2의 최대가속도, $GEBR_{T2}$ 은 열차 T2의 GEBR, T_{eGEBR} 은 GEBR 출력에 대한 등가제동 지연시간¹⁴, R_G 는 선로의 구배저항, D_{PU} 는 위치불확실성을 의미한다.

CBTC의 경우 T1열차와 T2 열차 간 안전간격은 T1 열차의 후미부가 분기 궤도구간을 완전히 빠져나오는 순간 최대값을 진다. T1 열차와 T2 열차의 최대 안전간격은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{ITV_{cbtc}} = D_{MSD} + D_{TL} + D_{TRL} - \frac{(V_{T2} - V_e)^2}{2a_{T2}} - \frac{\left(V_{T2} - V_e - \frac{FSB_{T2}(D_{TRL} + D_{TL})}{V_{T1} - V_e} \right)^2}{2a_{T2}} \quad (5)$$

여기서 D_{TL} 은 열차의 길이, D_{TRL} 은 분기기가 설치된 궤도구간의 길이, FSB_{T2} 는 열차 T2의 FSB(Full Service Brake)율을 의미한다.

ATCS의 경우 T1 열차와 T2 열차 간 최대 안전간격은 식 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{ITV_{atcs}} = D_{MSD} + D_{TL} + D_{SWA} - \frac{(V_{T2} - V_e)^2}{2a_{T2}} - \frac{\left(V_{T2} - V_e - \frac{FSB_{T2}(D_{SWA} + D_{TL})}{V_{T1} - V_e} \right)^2}{2a_{T2}} \quad (6)$$

여기서 D_{SWA} 는 선로분기구간을 의미한다.

Fig. 7과 같이 노선의 회차구간에서 열차 T1은 Z→P3→P4→S의 진로로 진출하며 열차 T2는 X→P1→P2→Y로 진입하고자 한다.

CBTC의 경우 열차 T1의 후미부가 완전히 분기의 궤도구간 D_{TRL} 을 빠져나갈 때까지 열차 T2는 궤도구간 전방에서 대기한다. 열차 T1이 완전히 궤도구간을 벗어나게 되면 열차 T2는 platform A에 정차를 위해

가속과 감속 운행을 수행한다.

열차 T1이 진출하는 거리는 식 (7)과 같다.

$$D_{eT1} = D_{PL} + D_{X2P} + 2D_{XM} + D_{CX} \quad (7)$$

여기서 D_{PL} 은 플랫폼 길이, D_{X2P} 는 분기기가 설치된 궤도구간과 플랫폼까지의 길이, D_{XM} 은 분기기 끝점부터 궤도구간 종단까지의 길이, D_{CX} 는 P3에서 P4까지의 대각선방향의 길이를 의미한다.

D_{CX} 와 D_{XM} 은 각각 식 (8), 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$D_{CX} = \csc(A_{FROG})D_{TS} \quad (8)$$

$$D_{XM} = \frac{1}{2}(D_{TRL} - \cos(A_{FROG})D_{CX}) \quad (9)$$

여기서 D_{TS} 는 두 선로 사이의 너비를 의미한다.

열차 T1의 진출시간은 식 (10)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{eT1_{cmv}} = \sqrt{\frac{2D_{eT1}}{a_{T1}}} \quad (10)$$

여기서 a_{T1} 은 T1의 가속도를 의미한다.

열차 T2가 platform A에 정차하는 시간은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{aT2_{cmv}} = \sqrt{\frac{(2a_{T2}D_{aT2})}{d_{T2}(a_{T2} + d_{T2})}} + \sqrt{\frac{(2d_{T2}D_{aT2})}{a_{T2}(a_{T2} + d_{T2})}} + T_{throw} \quad (11)$$

여기서 a_{T2} 는 열차 T2의 가속도, D_{aT2} 는 열차 T2의 주행거리, d_{T2} 는 열차 T2의 감속도, T_{throw} 는 선로 전환기 전환시간을 의미한다.

ATCS의 경우 열차 T2는 CBTC의 경우와 마찬가지로 platform A에 정차한다. 반면 열차 T1은 열차 T2가 platform A에 정차하는 동안 분기구간 SA3의 종점까지 주행 후 대기 한다. 열차 T2의 후미부가 선로교차구간 B를 지나는 순간 열차 T1은 다시 주행을 시작하여 T1의 후미부가 분기의 궤도구간 D_{TRL} 을 빠져나올 때까지 주행한다.

열차 T1이 platform B를 출발하여 분기영역 SA3까지 주행하는 거리와 선로교차구간 B를 지나 분기의

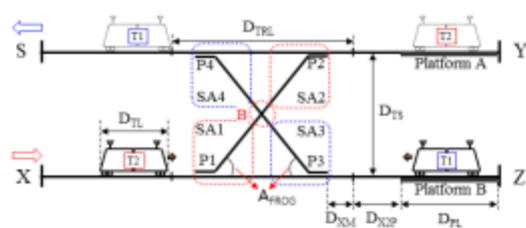


그림 7. 회차를 위한 선로 레이아웃
Fig. 7. Track layout for turn-back

궤도구간 D_{TRL} 을 빠져나올 때까지 주행거리는 각각 식 (12), 식 (13)과 같이 표현할 수 있다.

$$D_{eT1_{ATCS-1}} = D_{X2P} + D_{XM} + D_{SWA} \quad (12)$$

$$D_{eT1_{ATCS-2}} = D_B + D_{SWA} + D_{XM} + D_{TL} \quad (13)$$

여기서 D_{SWA} 는 선로분기구간의 길이, D_B 는 선로 교차구간 B의 길이를 의미한다.

열차 T1의 주행시간은 식 (14)와 같이 표현 할 수 있다.

$$T_{eT1_{ATCS}} = \sqrt{\frac{(2d_{T1}D_{eT1_{ATCS-1}})}{a_{T1}(a_{T1} + d_{T1})}} + \sqrt{\frac{(2a_{T1}D_{eT1_{ATCS-1}})}{d_{T1}(a_{T1} + d_{T1})}} + \sqrt{\frac{(2D_{eT1_{ATCS-2}})}{a_{T1}}} + T_{wait} \quad (14)$$

여기서 T_{wait} 는 열차 T2가 선로교차구간 B를 완전히 지나는 시간동안 열차 T1이 분기영역 SA3의 종점에서 대기하는 시간을 의미한다.

IV. 실험 및 분석

본 절에서는 Matlab을 이용한 시뮬레이션을 통해 제안된 선로분기 알고리즘의 성능을 기존의 CBTC와 비교분석한다.

4.1 시뮬레이션 환경

Table 1은 시뮬레이션에서 이용된 파라미터이다. 본 실험에 사용된 열차의 사양은 도시철도 표준전동차에 준하여 정의한다^[15]. 분기기의 경우 8번 분기기에 대한 사양을 적용하였으며, 분기의 궤도구간 길이는 일반적으로 10량을 단위편성으로 가지는 도시철도 궤도구간을 기준으로 정의하였다. 선로분기구간의 성능을 평가하기 위해 열차의 간격제어 성능은 CBTC와

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation Parameters

Term	Value	Unit
train length (D_{TL})	200	m
train width (D_{TW})	2.65	m
maximum train speed (V_{T1}, V_{T2})	80	km/h
dynamic throw	0.2	m
central throw	0.142	m
end throw	0.162	m
acceleration rate (a_{T1}, a_{T2})	3.0	km/h/s
service brake deceleration rate (d_{T1}, d_{T2})	3.5	km/h/s
GEBR ($GEBR_{T1}, GEBR_{T2}$)	4.5	km/h/s
equivalent braking response time for emergency brake (T_{cGEBR})	1.3	sec
position uncertainty (D_{PU})	± 6.25	m
speed sensor error (V_e)	± 2	km/h
track width (D_{TRW})	1.435	m
switch track length (D_{TRL})	200	m
switch angle (A_{FROG})	7.1517	°
platform length (D_{PL})	200	m
distance from cross-over track to platform (D_{XSP})	20	m
distance track separation (D_{TS})	10	m
length of switch (D_{SE})	26.190	m
switch throw and lock time (T_{throw})	6	sec

ATCS 모두 CBTC 성능의 최소안전간격을 동일하게 적용하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 8은 Fig. 6의 선로분기 상황을 CBTC와 ATCS를 비교한 결과이다. 두 열차 모두 60km/h의 속도로 선로분기구간을 순방향으로 통과 예정이다. CBTC와 ATCS 모두 선행열차 T1은 초기속도 그대로 통과한다. 하지만 후행열차 T2의 경우 CBTC는 T1의 후미부가 궤도분기구간을 완전히 빠져나올 때까지 감속을 하게 되는 반면 ATCS의 경우 궤도분기구간보다 작은 세마포어 영역인 SA구간을 완전히 빠져나올 때까지 감속을 하게 된다. ATCS의 경우 SA구간을 통과하는데 약 2.4초에 불과하기 때문에 감속에 의한 영향이 미미하다. 하지만 CBTC의 경우 T1이 궤도분기구간 시점에 후미부가 완전히 점유된 시점(약 25초 지점)부터 궤도분기구간 종점에 후미부가 완전히 빠져나오는 시점(약 37초 지점)까지 12초가 소요되며 T2 열차는 해당 시간동안 감속이 이루어지게 된다. 결과적으로 CBTC의 경우 분기상황 이후 운전시격은 약 30초이

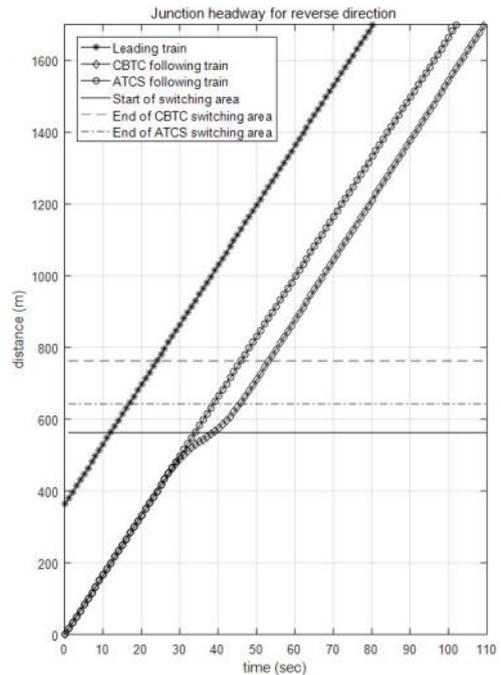


그림 8. 60km/h에서의 선로분기 상황 결과
Fig. 8. Junction throughput at 60km/h

며 ATCS의 경우 약 22초로 약 27% 높은 간격제어 효율을 갖고 있음을 확인 할 수 있다.

Fig. 9는 선행열차 T1과 후행열차 T2가 30km/h의 속도로 선로분기구간을 역방향으로 통과하는 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 보여준다.

일반적으로 분기 역방향은 분기 각도에 따른 곡선에 대한 영향으로 인해 속도를 30km/h 이하로 제한을 갖는다. CBTC의 경우 후행열차 T2는 선행열차의 후미부가 궤도분기구간 시점을 완전히 진입하는 순간(약 48초 지점)부터 감속을 수행하고 궤도분기구간의 종점을 완전히 빠져나오는 순간(약 75초 지점)까지 감속이 이루어지게 된다.

반면 ATCS의 경우 SA 구간을 통과하는데 불과 4.8초가 소요되기 때문에 감속에 의한 영향이 미미하다. 결과적으로 CBTC의 경우 분기상황 이후 운전시격은 약 52초이며 ATCS의 경우 약 32초로 약 39% 높은 간격제어 효율을 갖고 있음을 확인 할 수 있으며 분기 방향이 순방향인 경우보다 역방향인 경우 효과가 더 높음을 알 수 있다.

Fig. 10은 선행열차 T1과 후행열차 T2의 속도를 60km/h로 고정시킨 상태에서 다양한 분기 종류를 대상으로 후행열차 T2의 속도변화를 시뮬레이션 결과를 보여준다.

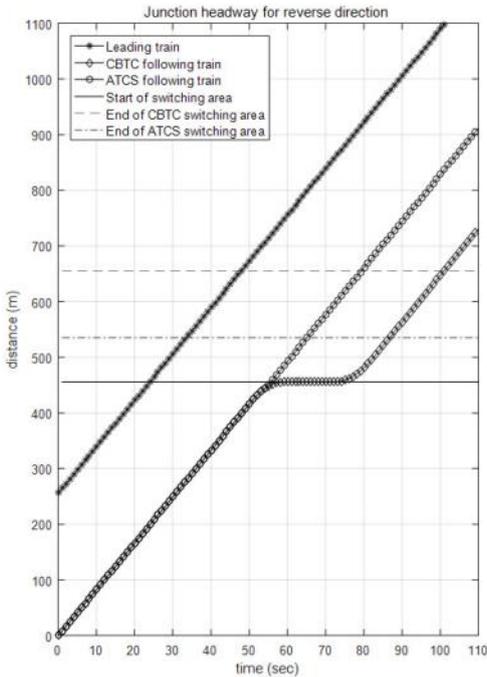


그림 9. 30km/h에서의 선로분기 상황 결과
Fig. 9. Junction throughput at 30km/h

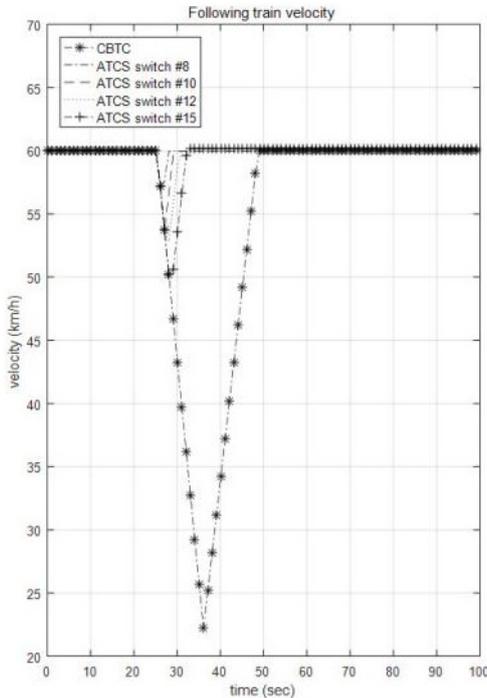


그림 10. 분기 종류에 따른 후행열차의 속도변화
Fig. 10. Speed changes of the following train versus type of switch

CBTC의 경우 분기 종류와 관계없이 궤도분기구간이 세마포어 영역이므로 후행열차 T2의 속도는 약 22 km/h까지 감속이 이루어진다. 반면 ATCS는 분기 종류에 따라 분기 길이와 접촉한계점이 결정되므로 세마포어 영역이 변하게 된다. 분기의 번호가 클수록 분기 각도가 작으며 접촉한계점을 반영한 세마포어 영역이 길어지게 된다. ATCS의 경우 15번 분기에서 약 50km/h까지 감속이 이루어지게 된다.

Fig. 11과 Fig. 12는 Fig. 7의 회차 상황에서 각각 CBTC와 ATCS의 회차시간을 시뮬레이션한 결과를 보여준다.

CBTC의 경우 진입하는 열차 T2가 종착역에 완전히 진입한 이후에 진출하는 열차 T1이 P3, P4 선로전환기를 역방향으로 동작(6초 소요)시킨다. 열차 T1은 선로전환기가 전환이 완전히 이루어진 경우 진출하게 된다. 열차 T2가 종착역을 향하여 진입을 시작하는 시점부터 열차 T1의 후미부가 회차구간을 빠져나오는 순간까지의 시간을 회차시간(Turnout time)으로 측정하였다. CBTC의 경우 전체 회차시간은 약 80초이다.

ATCS의 경우 진입하는 열차 T2와 진출하는 열차 T1은 모두 함께 주행하게 된다. 진입하는 열차 T2는 진출하는 열차 T1과 공유해야하는 선로교차구간 B에

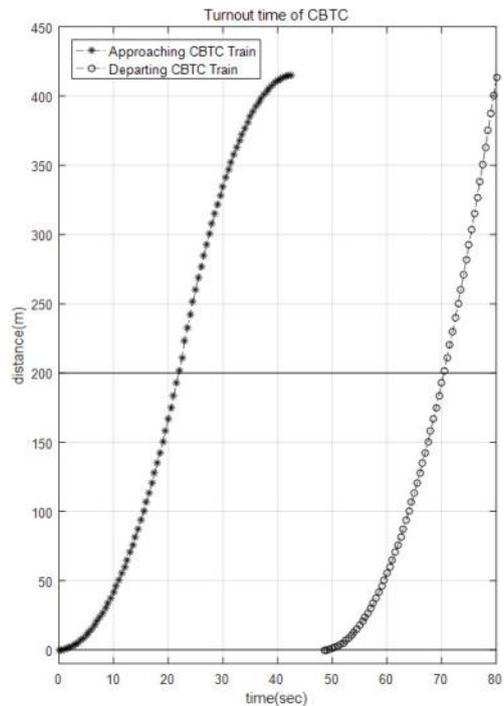


그림 11. CBTC의 회차시간
Fig. 11. Turnout time of CBTC

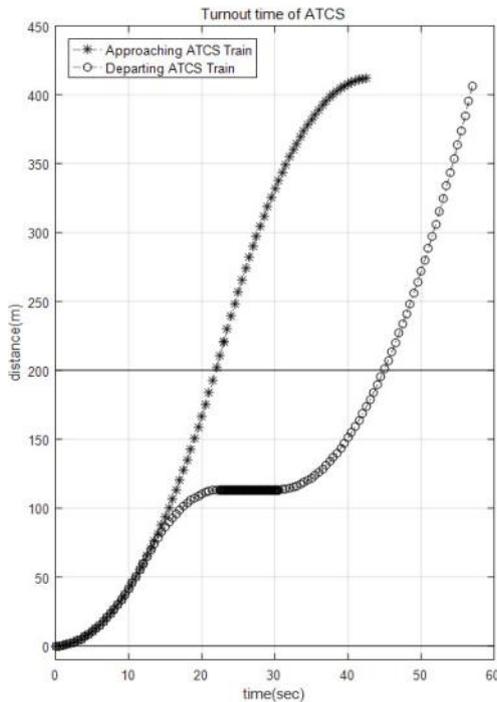


그림 12. ATCS의 회차시간
Fig. 12. Turnout time of ATCS

대한 우선 점유를 한 상태이므로 진출하는 열차 T1은 선로교차구간 전방에서 대기하며 자신이 확보한 선로 전환기 P3, P4에 대한 전환을 미리 수행할 수 있다. 마찬가지로 열차 T2가 종착역을 향하여 진입을 시작하는 시점부터 열차 T1의 후미부가 회차구간을 빠져 나오는 순간까지의 회차시간은 약 56초이다.

동일한 조건의 열차와 선로임에도 ATCS의 최소한의 세마포어 영역으로 정의된 선로분기구간과 분기알고리즘으로 인해 회차시간이 약 30% 향상되었음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 열차간 통신기반 열차자율주행시스템을 위한 새로운 선로분기구간과 선로분기 알고리즘을 제안하였다.

안전하면서도 효율적인 열차운행을 위해 접촉한계점을 이용하여 최소한의 세마포어 영역을 ATCS 선로분기구간으로 정의하였다. 선로분기상황과 회차상황에서 ATCS 선로분기구간과 선로구간을 상호 배타적으로 분해하면서도 자원 사용 효율을 가질 수 있도록 선로분기 알고리즘을 제안하였다. 제안된 선로분기 알

고리즘의 성능을 분석하기 위해 선로분기와 회차 상황에서의 열차 안전간격과 운전시격을 기존의 CBTC와 비교분석하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 선로분기 알고리즘은 CBTC와 비교하여 우수한 성능을 보여주고 있음을 확인하였으며 다양한 분기기와 속도환경에서의 영향을 확인하였다.

향후 시스템 설계활동을 수행하면서 RM의 상세설계와 함께 기지와 같이 복잡하고 다양한 종류의 분기기로 구성된 노선에 대해서도 추가적인 연구를 진행할 계획이다.

References

- [1] T. Parkinson and I. Fisher, *Rail transit capacity*, vol. 13, Transportation Research Board, 1996.
- [2] IEEE Std. 1474.1, *IEEE Standard for Communication-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements*, 2004.
- [3] IEEE Std. 1474.3, *IEEE Recommended Practice for Communication-Based Train Control (CBTC) System Design and Functional Allocations*, 2008.
- [4] D. Wang, X. Chen, and H. Huang, "A graph theory-based approach to route location in railway interlocking," *Computers & Ind. Eng.*, vol. 66, no. 4, 2013.
- [5] K. Kanso, F. Moller, and A. Setzer, "Automated verification of signalling principles in railway interlocking systems," *Electronic Notes in Theoretical Comput. Sci.*, vol. 250, no. 2, 2009.
- [6] X. Chen, Y. He, and H. Huang, "An approach to automatic development of interlocking logic based on statechart," *Enterprise information systems*, vol. 5, no. 3, 2011.
- [7] S. Busard, et al., "Verification of railway interlocking systems," arXiv preprint arXiv:1506.03554, 2015.
- [8] S. Chang, et al., "Automation program for drawing and examination of locking sheet," *Conf. Korean Soc. for Railway*, pp. 1285-1293, Nov. 2008.
- [9] V. Hartonas-Garmhausen, et al., "Verification

of a safety-critical railway interlocking system with real-time constraints,” *Sci. Comput. Programming*, vol. 36, no. 1, pp. 53-64, Jan. 2000.

- [10] N. A. Zafar, S. A. Khan, and K. Araki, “Towards the safety properties of moving block railway interlocking system,” *Int. J. Innovative Comput. Inf. & Control*, vol. 8, no. 7, 2012.
- [11] S. Ryou, et al., “A study on interface between switch machine and axle counter and switch locking for operation of driverless train safety protection in shinbundang line,” *Conf. Korean Soc. Railway*, pp. 434-442, May 2013.
- [12] S. Oh, K. Kim, and H. Choi, “Train interval control and train-centric distributed interlocking algorithm for autonomous train driving control system,” *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, vol. 17, no. 11, 2016.
- [13] S. Oh, et al., “Headway calculation and train control algorithm for performance improvement in radio based train control system,” *J. Korea Academia-Ind. Cooperation Soc.*, vol. 16, no. 10, 2015.
- [14] S. Oh and Y.-J. Cho, “Shared resource allocation scheme and interval control algorithm for the T2T-Based autonomous train control system,” *J. KICS*, vol. 42, no. 9, pp. 1781-1791, 2017.
- [15] *Urban Rail Vehicle Standard Specification*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2013.

오 세 찬 (Sehchan Oh)



2004년 8월 : 광주과학기술원
정보통신공학과 석사
2013년 3월~현재 : 아주대학교
컴퓨터 공학 박사과정
2004년 11월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원

<관심분야> 무선통신기반 열차제어, UTO/DTO 설
계, 시스템 모듈화 설계

조 영 종 (Young-Jong Cho)



1985년 2월 : KAIST 석사
1990년 2월 : KAIST 박사
1996년 3월~현재 : 아주대학교
교수

<관심분야> 기계학습 활용, 무
선 네트워크, 트래픽 모델링,
네트워크 코딩