

열차간 통신기반 열차자율주행제어시스템의 주행안전기능 설계 및 구현: Part II

이병훈*, 채성윤*, 최현영*, 방준호*

Design and Implementation of Safety Functions of Communication-Based Autonomous Train Control System: Part II

Byung-Hun Lee*, Sung-Yoon Chae*, Hyeon-Yeong Choi*, Jun-Ho Bang*

요약

본 논문은 이전 연구결과인 Part I^[9] 이어서 열차자율주행제어시스템의 ATP 차상장치 주행안전기능을 설계 및 구현한다. Part I 에서는 열차자율주행제어시스템의 주행안전기능 중에 열차 간의 최소한의 안전 간격을 유지하기 위해서 열차의 위치를 결정하고, 이동권한을 계산하는 기능을 구현 및 테스트 하였다. 이 논문에서는 열차자율주행제어시스템의 주행안전기능 중에 안전감속도를 계산하고 동적속도프로파일을 생성 및 감시하는 기능을 설계하고 구현하였다. 또한 각 기능별 모듈을 테스트케이스를 통해 검증하고 Part I 의 구현 기능과 통합하여 주행안전기능을 시뮬레이션하였다. 이를 위해 안전성 및 신뢰성있는 소프트웨어를 제작하기 위한 소프트웨어 개발툴인 SCADE 를 활용한다.

키워드 : 열차자율주행제어시스템, 주행안전기능, 차상ATP, SCADE

Key Words : autonomous train control system, safety functions, onboard ATP, SCADE

ABSTRACT

In this paper, we design and implement the safety functions of the autonomous train control system which was studied in our previous work^[9]. The safety functions of the autonomous train control system includes the determination of the train position, calculation of dynamic speed profile and supervision of the speed. Following the previous work in Part I, we design a part of the safety function including the calculation of safe deceleration and generation of dynamic speed profile. We perform model-specific tests of functions designed by using SCADE. We integrate the designed models to verify the safety function of ATP.

I. 서론

열차 간 통신기반 열차자율주행제어시스템은 주행 안전기능을 차상에서 수행하며 열차 간 직접통신을 기반으로 선로자원 분배를 열차 간 협업을 통해서 결

정하게 된다^[1]. 기존의 열차주행제어시스템인 CBTC(Communication based Train Control) 시스템^[2, 3]이 지상ATP(Automatic Train Protection)로부터 이동권한 및 속도프로파일을 수신하는 반면 열차자율주행제어시스템은 열차 스스로 이동권한, 경로, 속도

※ 본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

• First & Corresponding Author : Korea Railroad Research Institute, bhlee85@krii.re.kr, 정희원

* Korea Railroad Research Institute, {nichae, hchoi}@krii.re.kr, 정희원; jhbang@krii.re.kr

논문번호 : 201912-326-D-RU, Received December 2, 2019; Revised December 17, 2019; Accepted December 23, 2019

등을 결정하게 된다. 이러한 기능을 통해 지상의 설비를 최소화하고, 열차 간 통신을 통해 주행 정보를 교환하여 운영의 효율성을 높인다. 열차의 위치결정, 자원관리, 동적속도프로파일 등을 포함하는 주행안전기능이 지상에서 차상으로 옮겨오면서 열차제어를 위한 새로운 시스템요구사항이 필요하게 된다. 본 논문에서는 이러한 새로운 시스템 요구사항을 기반으로 설계한 주행안전기능을 설명하고 구현한다. 이전 연구결과인 Part I^[9]에서는 주행안전기능 중 위치결정, 이동권한, 자원관리 기능을 설계 및 구현 하였으며, 본 논문은 Part I의 결과^[9]에 이어서 안전감속도 계산과 동적 프로파일 생성 및 속도감시 기능을 설계 및 구현한다. 또한 안전주행기능을 통합하는 시뮬레이션 환경을 구성하여 기능을 검증한다. 열차자율주행제어시스템의 주행안전기능은 열차의 안전기능을 담당하므로 소프트웨어 구현 시 소스코드에 대한 높은 신뢰성을 보장하여야 한다. SCADE는 안전성 및 신뢰성이 보장된 제어 어플리케이션을 개발하기 위한 소프트웨어 개발 도구로, 주로 산업 제어설비, 비행 제어 소프트웨어, 국방 소프트웨어, 철도 소프트웨어 등에서 이용된다^[5].

본 논문에서는 열차자율주행제어시스템 주행안전기능 중 일부를 SCADE를 통해 설계 및 구현하고, 이를 테스트 및 시뮬레이션을 통해 검증한다. 구현된 열차자율주행제어시스템의 주행안전기능 모델을 검증하기 위해서 통합 시뮬레이션 환경을 구성하고 화면에 검증결과를 출력하는 GUI 모델을 만든다. 최종적으로 생성된 소스코드를 열차자율주행제어시스템 프로토타입 테스트환경에서 검증한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 열차자율주행제어시스템의 구조 및 컴포넌트 별 핵심 기능을 설명하고, ATP 차상장치의 주행안전기능을 설계 및 구현, 테스트한다. 3장은 결론이다.

II. 본 론

2.1 SCADE 기반 모델링

SCADE(Safety-Critical Application Development Environment)는 임베디드 소프트웨어를 위한 모델 기반 개발 환경이다. SCADE는 요구사항 관리, 모델기반 설계, 모델 시뮬레이션, 인증된 코드생성 등을 포함하는 통합 설계환경을 제공한다. 항공/철도/국방/원자력/자동차 등 안전이 중요시 되는 제어 어플리케이션의 설계에 적합한 개발도구이며, SCADE의 코드생성기는 EN50128^[5] 표준이 명시한 철도신호시스템의 신뢰성, 안전성에 대해서 SIL(Safety Integrity

Level)3/4 수준의 인증된 소스코드를 생성한다. 특히 모델 개발 단계에서 정형기법^[4]에 기반한 모델 검증이 가능하고, 설계한 모델과 모델로부터 생성한 소스코드의 일치성을 보장하기 때문에 코드 커버리지(code coverage) 분석이나 코드의 검증 및 인증에 소요되는 시간과 비용을 줄일 수 있다. 열차자율주행제어시스템의 ATP 차상장치는 열차의 안전 기능을 담당하는 서브시스템으로 높은 신뢰성 및 안전성이 요구되는 소프트웨어를 탑재하여야 한다^[9].

2.2 시스템 개요

열차자율주행제어시스템(Autonomous Train Control System)은 그림 1과 같이 지상(wayside)과 차상(onboard) 시스템으로 구성된다. 지상시스템은 노선 전체의 열차운행 상황 모니터링을 위한 ATS(Automatic Train Supervision), 선로 및 선로전환기 자원의 점유를 기록하는 자원관리자, 선로전환기를 컨트롤하는 OC(Object Controller) 등의 서브시스템으로 구성된다^[6]. 차상시스템은 열차의 이동권한, 속도 등을 관리하는 ATP 차상장치, 열차의 운행 경로 설정, 운행 속도 조절 등의 기능을 담당하는 ATO(Automatic Train Operation) 차상장치, 열차 및 지상시스템과의 통신을 위한 무선통신시스템, 타코미터, 제동시스템, 태그리더기 등의 서브시스템으로 구성된다. ATP 차상장치에서 열차의 위치, 속도, 이동권한을 기반으로 계산된 열차의 속도프로파일을 이용하여 ATO 차상장치는 다음 목적지까지의 운행 및 플랫폼 정차, 출입문 제어를 위한 허용 속도프로파일을 생성한다^[7].

본 논문은 열차자율주행제어시스템의 서브시스템인 ATP 차상장치의 주행안전기능 설계 및 구현에 대

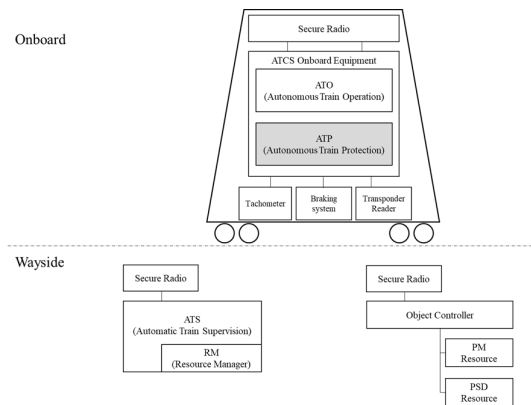


그림 1. 열차자율주행제어시스템 구조[9]
Fig. 1. Autonomous train control system architecture[9]

해 기술한다. ATP 차상장치의 주행안전기능은 열차의 안전한 운행을 위해 ATP 차상장치에서 담당하는 핵심 기능 중 하나이다. ATP 차상장치는 현재 열차의 위치, 속도, 점유된 자원, 이동권한 및 선형 열차의 위치, 자원 점유 현황, 속도 등을 고려하여 현재 열차의 상용제동/비상제동 속도프로파일을 생성한다. 생성된 속도프로파일을 기반으로 열차가 주행 중에 속도프로파일의 한계값을 초과할 경우 ATP 차상장치에서는 추진을 차단시키고, 초과한 속도프로파일에 맞는 제동 명령을 제동시스템으로 전달한다. 이를 통해 열차의 속도는 항상 선형열차와 안전간격을 침범하지 않는 한계점 이내로 제어되는 것을 보장한다. 열차자율주행 제어 시스템의 중요한 특징중 한가지는 열차간 협업을 통해 열차가 스스로 주행안전기능을 수행하는 것이다. 기존시스템이 열차의 위치정보를 지상에서 수신하여 지상설비가 이동권한을 생성하는데 반해 열차자율주행제어 시스템은 열차가 스스로 이웃열차의 위치 및 속도정보를 기반으로 이동권한을 관리하고 이동권한 정보를 바탕으로 속도프로파일을 계산한다. Part 1^[9]에서는 이웃열차의 정보를 기반으로 이동권한을 생성하는 기능을 설계 및 구현하였다면, 이 논문에서는 Part 1^[9]에서 구현한 이동권한 생성 기능을 기반으로 동적속도프로파일을 생성하고 속도를 감시하는 기능을 설계 및 구현한다. 또한 Part 1^[9]에서 구현한 위치 결정 및 이동권한 생성등의 기능을 동적속도프로파일 생성 및 속도감시 기능과 통합하여 시뮬레이션을 수행한다. 주행안전기능에 대한 세부 기능과 기능들 사이의 관계는 그림 2 에 나타난다.

2.3 안전감속도 생성 기능 설계 및 구현

열차의 제동 감속도(deceleration)는 열차의 속도(speed)나 선로의 구배(gradient)에 따라 변한다. 제동 장치의 특성이나 구성에 따라 저속에서는 낮은 감속도를 가지고 고속에서는 높은 감속도를 가질 수 있으며, 열차가 하구배나 상구배에 위치함에 따라 더 높은 감속도 혹은 낮은 감속도를 가진다. 그러므로 열차의 속도에 따른 제동모형을 구하고, 거리에 따른 구배정보를 조합하여 속도와 거리에 따른 안전감속도(safe deceleration) 모델을 구해야 한다. 안전감속도 모델은 속도와 거리를 입력으로 하는 함수로 정의할 수 있다^[10].

$$Dec_s(v, d) = Dec(v) + Dec_{grad}(d) \quad (1)$$

v 는 열차속도이며, d 는 거리를 의미한다. Dec_s 와 Dec 는 각각 안전감속도 값과 속도에 따른 제동모형을 의미한다. Dec_{grad} 는 구배변화에 따른 감속도 변화량을 의미하며 계산식은 아래와 같다^[10].

$$Dec_{grad}(d) = g \times \frac{Grad_c}{1000 + 10M_R} \quad (2)$$

g 는 중력가속도($\approx 9.8 m/s^2$)이며, M_R 은 회전 질량이다. $Grad_c$ 는 열차의 길이가 반영된 구배정보를 의미한다.

열차의 방호를 위해서는 감속도 모델을 보수적으로 생성하는 것이 합리적이므로, 구배에 따라 감속도 값

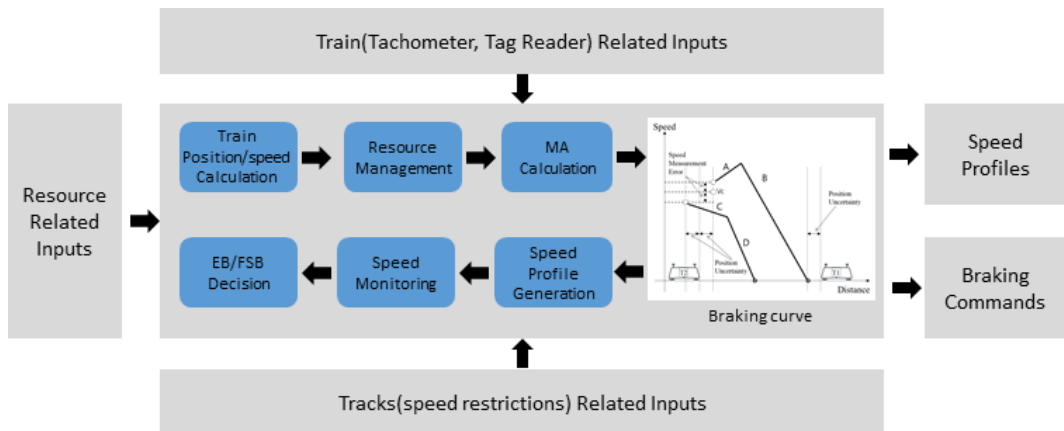


그림 2. 주행안전기능 세부 기능모듈[9]
Fig. 2. Safety sub-functions[9]

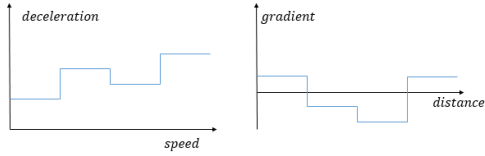


그림 3. 속도에 따른 감속도 모델(왼쪽) 과 거리에 따른 구배정보(오른쪽)에서
 Fig. 3. Examples for braking model(left) and gradient profile(right)

이 낮아지는 경우를 우선 고려해야한다. 열차가 하구배를 통과할 때 감속도 값이 낮아지므로 이를 반영하기 위해 열차의 후방 끝부분이 하구배를 완전히 통과하는 위치까지 실제 구배 값을 하구배 값으로 보상해주는 과정이 필요하다. 결론적으로 식(1)에서 $Grad_c$ 는 열차길이를 기반으로 수정된 구배 프로파일(compensated gradient profile)을 표현한다. 열차의 길이를 L 이라고 하면 수정된 구배 프로파일은 아래의 조건을 만족하도록 그린다.

거리에 따라 구배값이 낮은 값에서 높은 값으로 변하는(rising edge) 구간에서는 언제나 낮은 값을 가진 구배프로파일을 L 만큼 연장한다.

거리에 따라 구배 값이 높은 값에서 낮은 값으로 변하는(falling edge) 프로파일은 수정하지 않는다

그림 4 은 이러한 조건을 만족하도록 구배 프로파일을 수정한 예시를 보여준다.

SCADE를 기반으로 상술한 기능을 구현한다. 열차 길이를 반영한 수정된 구배프로파일을 계산하는 모델

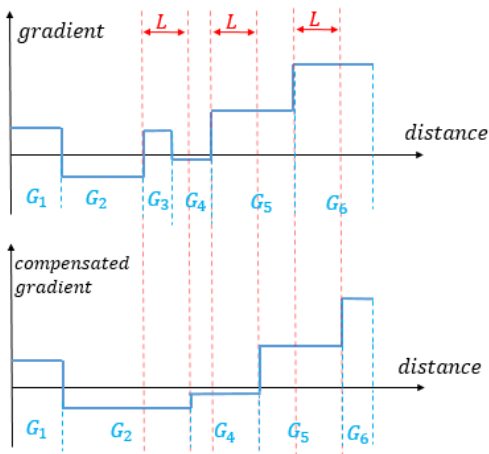


그림 4. 거리에 따른 구배프로파일(위)과 열차길이 L 를 반영한 수정된 구배프로파일(아래)
 Fig. 4. Gradient profile(up) and compensated gradient profile(down).

은 그림 5 와 같다. 그림 5 에서 표현한 모델을 통해 $Grad_c$ 를 계산하고 그림 6 에서 식 (1)과 식 (2)를 구현한 모델이 나타난다. 그림 5의 모델은 구배프로파일을 배열형식의 입력 값으로 가지며, 입력 값을 열차 길이 L 의 사이즈 만큼 검사하여 가장 낮은 구배값을 반환한다. 그림 6의 모델은 수정한 구배프로파일을 입력값으로 가지며 속도와 위치에 따라 계산된 안전감속도를 반환한다. 안전감속도는 속도와 위치에 관한 함수 값이므로 2차원 배열형식을 가진다.

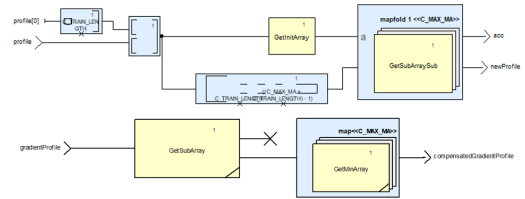


그림 5. 열차길이를 반영한 수정된 구배프로파일계산
 Fig. 5. Model of the compensated gradient profile based on the train length

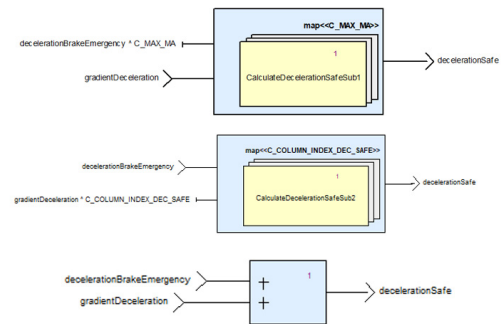


그림 6. 안전감속도 모델
 Fig. 6. Model of the safe deceleration safe

2.4 동적속도프로파일 계산기능 설계 및 구현

동적속도프로파일은 MRSP(Most Restrictive Speed Profile)로부터 계산한 제동곡선을 의미하며, 속도감시에 이용한다.

동적속도프로파일의 종류에는 EBD(Emergency Brake Deceleration), EBI(Emergency Brake Intervention), SBI(Service Brake Intervention), Warning curve, 허용속도곡선 등이 있으며, 제동곡선들 간의 관계는 그림 7 에서 나타나는 바와 같다. 각 제동곡선을 계산하는 방법은 아래에 서술한다.

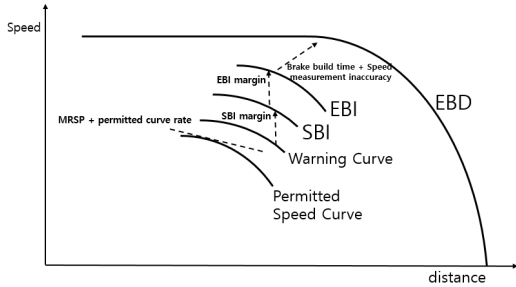


그림 7. EBD와 제동곡선들 간의 상관성[10]
Fig. 7. EBD and related supervision limits[10]

2.4.1 EBD 계산기능 설계 및 구현

EBD 를 계산하기 위해 먼저 MRSP 에 열차와 노선환경을 고려한 특정 속도 값을 더하여 Ceiling Supervision Limit을 구하게 된다. 그리고 Ceiling Supervision Limit을 기반으로 속도가 변하는 변곡점에서 안전감속도 Dec_s 를 기율기로 하는 제동곡선을 구하게 된다. 이때 MA(Movement Authority) 의 속도 값을 비교하여 EBD가 MA의 속도 값을 넘지 않도록 한다. 이를 SCADE 로 설계한 모델은 그림 8 과 같다.

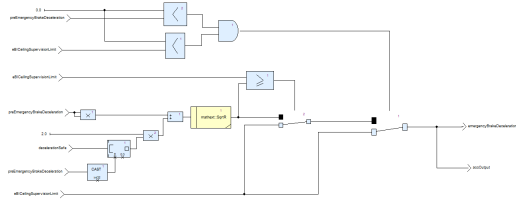


그림 8. EBD 계산 기능
Fig. 8. Model for the EBD

2.4.2 EBD 관련 제동곡선 계산기능 및 구현

EBD 로부터 EBI, SBI, warning curve, 허용속도 곡선 등을 계산한다. 열차의 속도가 EBI를 초과할시에 비상제동을 체결하게 되며, 열차가 비상제동시에 도 EBD 의 속도를 초과하지 않도록 열차의 제동성능을 고려해서 EBI를 계산한다. EBI 는 열차의 제동 빌드 업 시간과 속도측정의 부정확성을 고려하여 가장 보수적인 속도프로파일의 조합으로 구성한다. SBI와 warning curve 는 열차의 상용제동특성을 고려한 특정 속도 값을 빼주는 방법으로 계산한다. 허용속도곡선은 열차의 ATO 가 속도제어를 할 때 추종해야 하는 속도프로파일이며, warning curve의 속도를 초과하지 않아야 한다. 허용속도곡선은 MRSP로부터 열차

의 상용제동 성능을 고려한 기율기로 계산한다. 이러한 기능을 SCADE 로 구현하기 위해 속도프로파일을 특정 길이를 가진 배열로 정의하였으며, map 과 fold 오퍼레이터 기능을 활용하여 배열의 반복적인 계산을 수행하였다. 그리고 제곱근과 같은 비선형적인 연산을 수행하기 위해 외부 라이브러리를 참조하였다. EBI 와 허용속도곡선을 구현한 모델은 그림 9 과 그림 10 에 나타난다. 그림 10의 모델은 EBD를 입력값으로 가지며 시간과 속도, 감속도의 상관성을 구현하여 거리에 따른 허용속도 값을 반환한다.

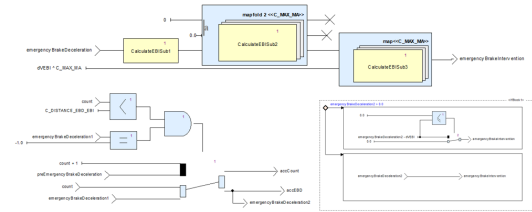


그림 9. EBI 계산 기능
Fig. 9. Model for the EBI

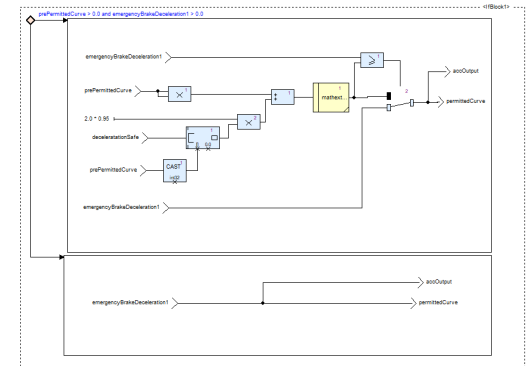


그림 10. 허용속도곡선 계산 기능
Fig. 10. Model for the permitted curve

2.4.3 속도감시 및 제동명령출력

열차의 현재 속도가 제동곡선을 초과하는지 감시하고 속도를 초과하는 순간 비상제동이나 상용제동 명령을 출력한다. 제동곡선은 항상 현재 열차의 위치를 기준으로 계산하며, 제동곡선의 배열 중 첫 번째 인덱스가 현재의 열차위치에 대응한다. 그러므로 SCADE 로 모델을 구현할때는 제동곡선 배열의 첫 번째 인덱스 요소와 열차의 속도 값을 비교한다. 비상제동을 체결한 후에는 열차가 정지하기 전까지 비상제동 체결 명령을 유지해야 하며, 열차 정지를 확인한 뒤에 비상제동을 해제 할 수 있다. SCADE 모델 구현시에 비상

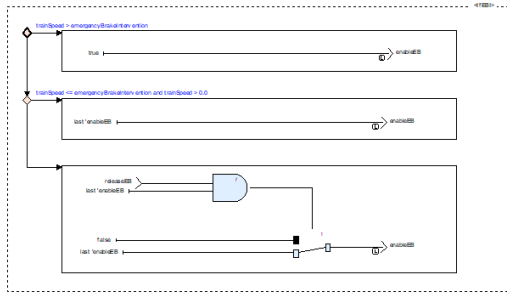


그림 11. EBI 감시 및 비상제동 체결 기능
Fig. 11. Model for supervision of EBI

제동 체결명령을 유지하는 것은 특정값을 메모리에 저장한다는 의미이며 이러한 기능을 수행하기 위해 node operator를 사용하였다. EBI를 감시하는 기능과 비상제동 체결 후 열차정지시까지 비상제동을 해제할 수 없는 기능을 구현한 모델은 그림 11 나타내었다.

2.5 안전주행기능 통합시물레이션

안전감속도 계산과 동적속도프로파일 생성 및 감시를 위한 세부 모듈을 검증하기 위해 테스트케이스를 만들고 모델에 대한 테스트를 수행한다. 모듈별 테스트를 수행함으로써 전체 시스템상에 소스코드를 통합할 때 불필요한 디버깅과정을 생략할 수 있다. 생성한 테스트케이스는 각 기능별로 입력값과 기대값을 포함한다. 입력값에 대한 출력값이 기대값과 같을 경우 해당 테스트케이스는 통과한 것으로 표시한다. 그림 12는 EBD 계산 기능에 대한 테스트케이스 예시이다. 즉, 테스트케이스에서 작성한 시나리오는 모델 시물레이션을 통해 검증하고 시물레이션을 통해 출력된 값은 테스트케이스의 기대값과 비교하여 각 기능에 대해서 요구사항이 SCADE 모델로 구현되었는지를 확인할 수 있다.

Part I 에서 설계한 열차의 위치결정, 자원 및 이동권한 관리를 위한 기능 모듈과 본 논문에서 설계한 안

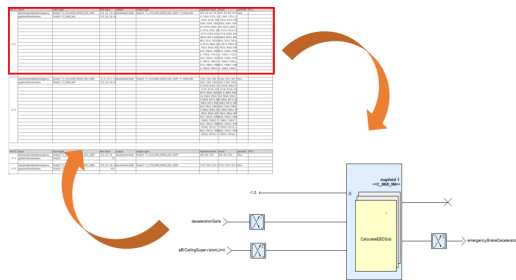


그림 12. EBD 계산 기능에 대한 테스트케이스 예시
Fig. 12. Test case for calculation of EBD

전감속도 계산, 동적속도프로파일 생성 및 감시 기능을 포함하는 안전주행기능의 통합시물레이션을 수행한다. 통합시물레이션을 위해 가상의 열차모델과 노선 모델을 설계하고, 주행안전기능을 통합한 모듈과 인터페이스 한다. 가상의 열차모델은 추진과 제동 기능을 포함하고 열차의 이동거리를 반환하도록 구현하였다. 선형열차의 위치를 결정하거나 방호구간 설정 등의 기능은 입력데이터의 시나리오로 정한다. 통합시물레이션 환경을 구현한 모델은 그림 13과 같다.

ATP 주행안전기능 모델의 출력데이터를 화면상에 보여주고 유지인터페이스를 구현하기 위해 SCADE Display 개발툴을 기반으로 GUI(Graphical User Interface)를 만들었다. GUI 상에는 열차의 속도계와 태그를 기준으로 한 위치정보, 이동권한, 동적속도프로파일과 열차의 속도변화 등이 그래픽으로 나타난다. 설계한 GUI 모델은 통합시물레이션 모델과 입출력 인터페이스를 연결하여 시나리오에 따른 기능을 검증한다. SCADE Display 개발툴을 기반으로 구현한 GUI 화면은 그림 14와 같다.

통합시물레이션을 위한 시나리오는 아래와 같다. 노선환경은 총 15 km를 생성하고, 200m 길이의 열차를 두 대 생성하여 노선 상에 위치시켰다. 열차의 위치를 결정하기 위한 Tag는 100m 간격으로 위치하고, 0m 지점에 1번 tag에서부터 15km 지점에 1501번 tag 까지 생성하였다. 열차의 목표속도는 80km/h이고, 열차는 속도 프로파일 내에서 열차의 속도가 목표속도

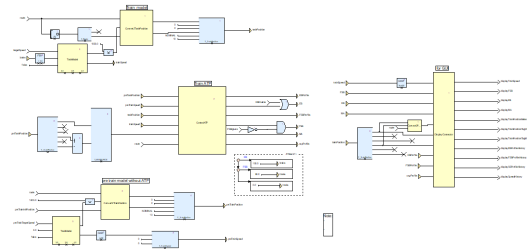


그림 13. 주행안전기능 통합 시물레이션 환경
Fig. 13. Integrity of safety-critical functions

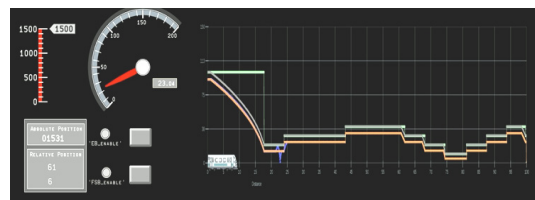


그림 14. GUI 화면
Fig. 14. GUI display

보다 작으면 가속하고, 크면 감속 주행하도록 하였다. 열차의 가속도는 3.5km/h/s이고 감속도는 상용제동, 비상제동에 따라서 각각 3.0km/h/s, 4.0km/h/s으로 설정하였다.

열차는 생성한 속도프로파일 내에서 목표속도에 이르기까지 가속하고, 목표속도에 도달하면 등속 주행을 수행한다. 열차속도가 SBI를 초과하면 상용제동이 체결된다. 비상제동을 체결하는 상황을 만들어 주기위해 임의로 열차속도가 SBI 초과해도 상용제동이 체결되지 않는 기능을 추가하였다. 열차속도가 EBI를 초과하면 열차는 비상제동 체결을 통해 속도를 감속하고, 열차가 완전히 멈춘 뒤 비상제동 해제 입력이 들어오면 운행을 재개한다. 시뮬레이션 환경은 표 1 에 표현한다.

SCADE를 기반으로 구현한 ATP의 주행안전기능을 검증하기위해 몇 가지 시나리오를 만들어 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션을 통해 열차가 이동함에 따라 이동권한과 동적속도프로파일(EBI, SBI 등)이 선로조건에 따라 적절하게 갱신되는지 검증하였으며, 선행열차가 저속으로 주행하는 시나리오를 만들어 후행열차가 충돌하지 않고 주행안전기능에 따른 간격제어를 수행하는지 확인하였다(그림 15 참고). 또한 열차의 전방에 방호구간을 설정하는 시나리오를 통해 열차가 방호구간을 침범하지 않고 주행안전기능에 따

라 정지하는 동작을 확인하였다.

III. 결 론

본 논문에서는 열차자율주행제어시스템 ATP 차상장치의 주행안전기능 중 안전감속도 계산과 동적속도 프로파일 생성 및 감시 기능을 설계하고 SCADE 개발틀로 구현하였다. 구현한 모델에 대한 검증은 기능별 테스트케이스를 생성하여 단위 테스트를 수행하고, Part I 에서 구현한 위치결정기능, 자원 및 이동권한 관리 기능 등과의 인터페이스를 구성하여 주행안전기능을 통합시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 시나리오에 대한 기능검증을 화면으로 보여주기 위해 SCADE-display 개발틀을 이용하여 GUI를 구현하였다. 향후, SCADE-kcg를 통해 생성한 소스코드를 ATP 차상장치 프로토타입에 탑재하여 기능을 검증한다.

References

- [1] S. Oh, "Next generation communication-based train control system," *J. Railway*, vol. 21, no. 3, pp. 79-86, 2018.
- [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] E. M. Clarke and J. M. Wing, "Formal methods: State of the art and future directions," *ACM Comput. Surv.*, vol. 28, no. 4, pp. 626-643, 1996.
- [5] Esterel Technologies, "*Efficient Development of Safe Railway Applications Software with EN50128 Objectives Using SCADE suite*," 5th Ed., 2009.
- [6] S. Oh and Y. Cho, "Track switching algorithm for the T2T-Based autonomous train control system," *J. KICS*, vol. 42, no. 11, pp. 2160-2169, 2017.
- [7] S. Oh and Y. Cho, "Shared resource allocation scheme and interval control algorithm for the T2T-Based autonomous train control system," *J.*

표 1. 주행안전기능 시뮬레이션 환경
Table 1. Parameters for the simulation

파라미터	값
노선 길이	15,000m
Tag 위치 간격	100m
열차 길이	200m
열차 목표속도	80km/h
열차 가속도	3.0km/h/s
열차 상용제동 감속도	-3.0km/h/s
열차 비상제동 감속도	-4.0km/h/s

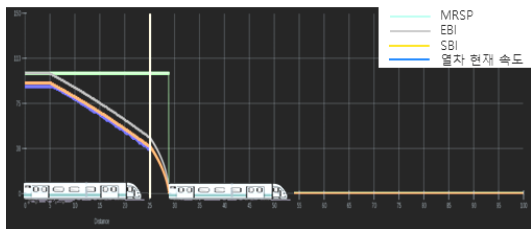


그림 15. 기능검증을 위한 시뮬레이션 화면
Fig. 15. Simulation for verification of the algorithm

- KICS*, vol. 42, no. 9, pp. 1781-1791, 2017.
- [8] 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. Soc.*, vol. 17, no. 11, pp. 1-9, 2016.
- [9] S. Chae, B. Lee, H. Choi, and J. Bang, "Design and implementation of safety functions of communication-based autonomous train control system: Part I," *J. KICS*, vol. 45, no. 1, pp. 146-154, 2020.
- [10] ERTMS/ETCS, *System Requirement Specification*, Chapter3, Subset-026-03, no. 3.4.0, Dec. 2014.

이 병 훈 (Byung-Hun Lee)



2017년 8월 : 광주과학기술원
(GIST) 기전공학부 박사
2017년 12월~현재 : 한국철도기
술연구원 선임연구원
<관심분야> 제어공학, 전자공학
[ORCID:0000-0001-9886-8198]

채 성 윤 (Sung-Yoon Chae)

한국철도기술연구원 주임기술원
[ORCID:0000-0001-9576-0114]

최 현 영 (Hyeon-Yeong Choi)

한국철도기술연구원 선임연구원
[ORCID:0000-0001-8028-2957]

방 준 호 (June-Ho Bang)

한국철도기술연구원 선임연구원
[ORCID:0000-0001-5676-4358]