

무인운영시스템에서의 운영시나리오 고찰

The Study of Operation Mode Principle in Driverless Railway System

공태연*†

Taeyeon Gong*†

초 록 최근 도입되고 있는 도시철도의 대부분 신호시스템은 CBTC에 기반한 무인열차시스템을 채택하고 있는 추세이다. 이러한 무인 운행 시스템은 기관사가 차량에 탑승하지 않고 운영됨으로 차량 고장 발생 시, 적재적소에 OCC에서 이를 대응하기 위한 운영 시나리오의 개발이 필수로 요구되고 있다.

본 논문에서는, CBTC 무인시스템에 요구되는 운영 시나리오의 개념 및 운영모드를 소개하고, ATO 자동운전 기능에 영향을 미치는 주요 차량 고장의 예와 더불어, 이에 대한 신호-차량 간 설계 고찰 사항에 대하여 설명하고자 한다.

주요어 : 무인운전, CBTC, 도시철도시스템, 운영시나리오, 정상모드, 고장모드, 비상모드

1. 서 론

무인 운전 시스템 (GoA4)의 운영 시나리오의 확립은 기관사 없이 OCC 운영사에 의하여 1차적으로 조치가 빠르게 이뤄져야 한다는 점에서 그 중요성을 부여할 수 있다. 주요한 차량 고장 혹은 비상상황 발생 시, OCC 사령에 제공되는 실시간 차량 정보를 바탕으로, 신속하게 OCC 운영자를 포함한 모든 운영 스텝이 대응할 수 있는 운영 절차를 확립할 수 있어야 하며, 안전하고, 효율적인 절차를 제공할 수 있는 적합한 설계 사양들이 고려되어야 한다.

본론에서는 운영시나리오 모드의 구분과 각 구분별 정의를 설명하고, 고장 모드 시나리오 중 차량에 국한하여 ATO/ATP의 자동운전 및 안전 기능에 영향을 미치는 주요 차량 고장의 예와 설계요구사항을 분석하고자 한다. 또한 운영적인 관점에서 각 시나리오 별 운영 대응 절차에 대하여 설명하고자 한다.

† 교신저자: 현대로템 기술연구소 시스템개발팀 공태연 책임 (libra080@hyundai-rottem.co.kr)

* 현대로템 기술연구소 시스템개발팀

2. 본 론

2.1 운영시나리오 모드의 구분과 정의

운영시나리오 모드는 정상, 고장, 비상모드 3가지로 구분된다.

정상모드에서는 어떠한 이벤트 (고장)이 발생했을 때 그 고장의 정도가 미미하여 지속 운행이 가능하거나, 혹은 해당 고장이 차량 시스템의 고장일 경우 OCC 사령의 원격 혹은 운영스텝에 의한 차상에서의 고장 Recovery 절차 후 정상 운영을 지속할 수 있다.

고장모드에선 발생한 고장의 Recovery가 불가할 경우 해당 고장의 승객 안전성 영향을 판단하여, 승객의 안전에 직접적으로 영향을 미치지 않는 고장일 경우 OCC 사령에 의한

최소한의 사전 처리 절차 (고장 시스템의 Isolation 등) 후 제한적으로 열차 운행이 가능하다. 발생한 고장이 차량 시스템의 고장일 경우 기본적으로 종착역까지의 운행을 권장하지만, 그 고장이 승객의 안락함에 미치는 영향도 등을 종합적으로 판단하여 조금 더 연장하여 운영 후 대기 차량과 교체될 수 있다. 차량 외부 시스템의 고장은 그 영향이 대부분 지역적으로 나타남으로 해당 구역의 운영이 제한될 수 있다. (예: 승강장 PSD (Platform Screen Door) 고장일 경우, 해당 역은 무정차 운행함)

비상모드에서는 발생한 고장이 승객 안전과 직접적인 연관이 있는 경우로, 차량 시스템 고장일 경우 승객 하차 후 기지 환송을 전제로 하며, 해당 고장의 정도에 따라서 즉시 승객하차, 다음역 하차로 구분할 수 있으며, 승객하차 후 자력으로 기지 환송이 불가할 경우, 구원운전 절차에 따른다.

각 운영모드의 구분 차트와 모드별 운영카테고리는 다음 오류! 참조 원본을 찾을 수 없습니다.을 참고한다.

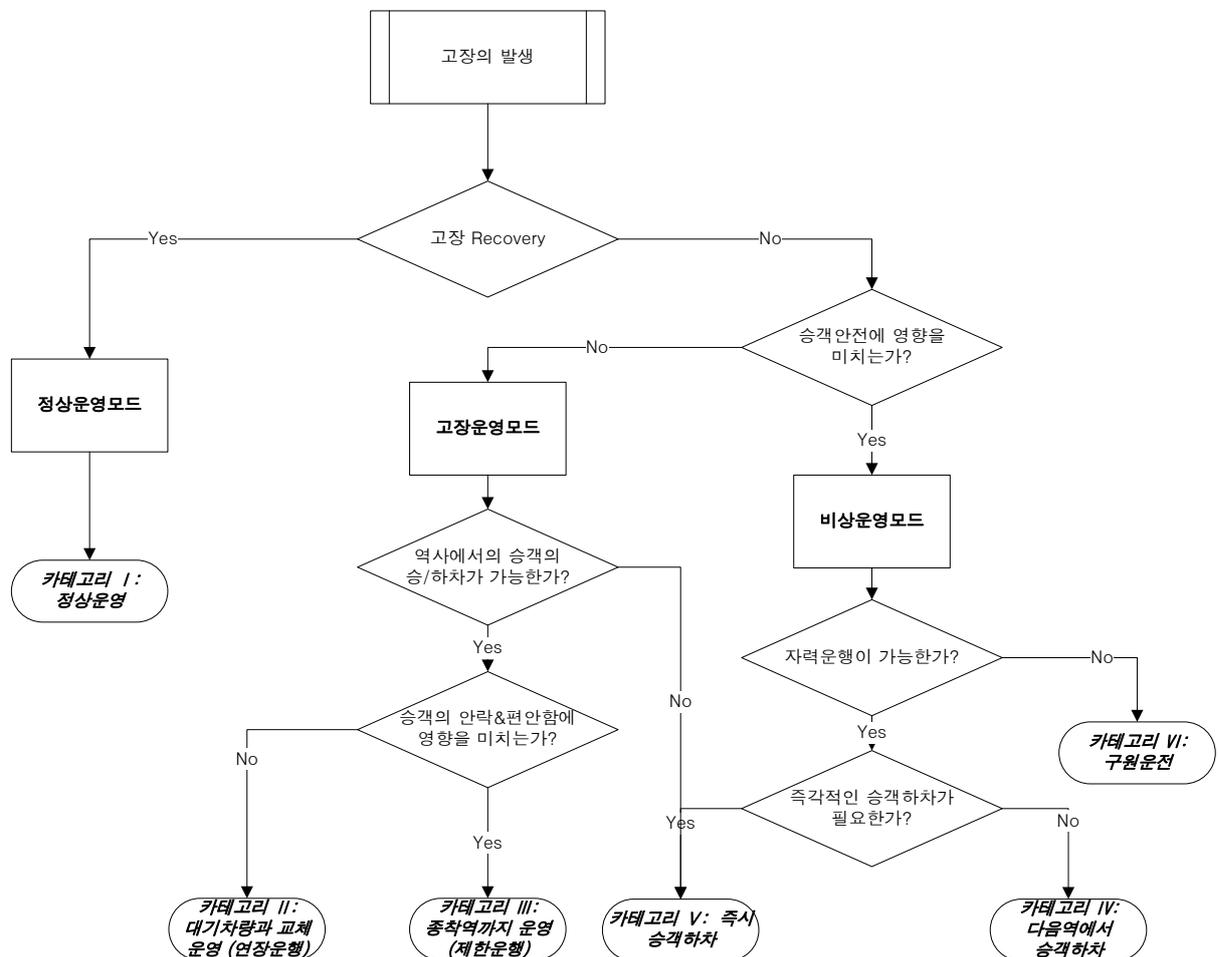


Figure 1 운영모드의 구분 및 카테고리

2.2 차량고장모드의 분석

이 절에서는 ATP/ATO 시스템의 자동운전 및 안전 기능과 연관이 있는 차량 시스템의 주요 고장 시나리오의 예를 알아보고 각 시나리오 별 차량/신호 시스템의 요구되는 시스템 설계 사양과 저자가 권장하는 운영 대응 절차에 대하여 설명하고자 한다.

상세한 분석 내용은 표 1에 함축적으로 기술하였으며, 이 표에서 기술한 차량/신호 시스템의 기능적인 영향은 IEEE 1474, IEC 62290 등의 국제 표준 규격에 기준한 일반적인 도시철도 무인신호시스템 사양과 기타 저자의 프로젝트 경험에 의하여 권장되는 사양을 기술하고 있다. 따라서, 해당 내용은 기 상용화 혹은 현재 설계 중인 도시철도시스템 혹은 운영처/발주처를 특정하지 않음을 주지하였으면 한다.

표 1 차량고장 시나리오 별 차량/신호 시스템 요구사항 및 권장 운영절차

순번	고장 차량 시스템	고장 시나리오	시스템별 설계 요구사항	권장 운영절차
1.	커플러	구원운전 중 편성 간 커플러 분리	<ul style="list-style-type: none"> 차량&신호: Train Integrity 소실에 따른 비상 제동 설계 차량: Safety 커플러 릴레이 및 이중화 회로 및 커플러 스위치 적용 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 V: 즉시 승객하차 고장 차량의 현차 조건에 따라서 OCC에서 자동 혹은 수동 승객 대피방송이 필요하며, 다른 구원 차량을 준비시킴
2.		단일편성 운행 시 차량 분리	<ul style="list-style-type: none"> 차량&신호: Train Integrity 소실에 따른 차량 및 신호 비상 제동 설계 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 V: 즉시 승객하차
3.	차량 출입문	부분적 출입문 미 열림	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 개별 차량 출입문을 모니터링하여 필요 시, 열리지 않은 차량 출입문에 상응하는 PSD 자체 isolation 차량&신호: 출입문 열림 고장 방송(수동) 송출 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 III: 종착역까지 운행 OCC로부터 출입문 열림 명령을 수차례 수행함. 그럼에도 동일 현상 지속 시, a. 해당 차량 출입문을 원격 Isolation 한 후 자동운행 지속 b. 수동 모드로 전환 후 해당 차량 출입문을 수동으로 Isolation 한 뒤 운행 지속
4.		완전한 출입문 미 열림	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 승강장 승객의 탑승을 막기 위한 PSD 재 닫힘 차량&신호: 출입문 열림 고장 (자동) 방송 송출 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 V: 즉시 승객하차 OCC로부터 출입문 열림명령을 수차례 수행. 그럼에도 동일현상 지속 시, 해당역에서 승객 전원하차 후 차량 기지환송
5.		부분적 출입문 미 닫힘	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 승객 안전을 위한 차량 미 발차 신호: 개별 차량 출입문을 모니터링하여 필요 시, 닫히지 않은 차량 출입문에 상응하는 PSD 자체 isolation 차량&신호: 출입문 닫힘 고장 방송(수동) 송출 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 III: 종착역까지 운행 OCC로부터 출입문 닫힘 명령을 수차례 수행함. 그럼에도 동일 현상 지속 시, a. 해당 차량 출입문을 원격 Isolation 한 후 자동운행 지속 b. 수동 모드로 전환 후 해당 차량 출입문을 수동으로 Isolation 한 뒤 운행 지속

			<ul style="list-style-type: none"> 차량: 추진 불가능 연동회로 설계 (단, 필요 시, 수동 모드에 한하여 추진을 가능토록 bypass 설계 가능) 	
6.		완전한 출입문 미 닫힘	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 승객 안전을 위한 차량 미 발차 및 승강장 승객의 탑승을 막기위한 PSD 재 닫힘 차량&신호: 출입문 닫힘 고장 (자동) 방송 송출 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 차량: 추진 불가능 연동회로 설계 (단, 필요 시, 수동 모드에 한하여 추진을 가능토록 bypass 설계 가능) 	카테고리 V: 즉시 승객하차 OCC로부터 출입문 닫힘 명령을 수차례 수행. 그럼에도 동일현상 지속 시, 해당역에서 승객 전원하차 후 차량 기지 환송
7.		운행 중 출입문 개방 (출입문 닫힘/잠김 신호 소실)	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 다음역까지 서행 및 정차 후 출입문 개방 후 대기 차량: 다음역 도착 후 추진 불가능 연동회로 설계 (단, 필요 시, 수동 모드에 한하여 추진을 가능토록 bypass 설계 가능) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 III: 종착역까지 운행 <ol style="list-style-type: none"> 해당 차량 출입문을 원격 Isolation 한 후 자동운행 지속 수동 모드로 전환 후 해당 차량 출입문을 수동으로 Isolation 한 뒤 수동 모드로 운행 지속 참고: 고장 출입문의 상태 및 개소 숫자에 따라서, 선별적인 운행이 가능 (카테고리 II 운용가능)
8.	장애물 감지기 (ODD: Obstacle Detection Device)	거짓 장애물 감지	<ul style="list-style-type: none"> 차량: 비상제동 체결 및 ODD Bypass 로직 설계 신호: 비상제동 체결 (configurable) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 IV: 다음역까지 운행 <ol style="list-style-type: none"> OCC 사령은 해당 장애물 감지의 진위를 파악 ODD bypass 스위치를 취급하여 비상제동을 완해 수동 모드로 전환 후 다음역까지 이동 후 승객하차 및 차량 기지회송
9.	휠 활주 방지 시스템 (WSP: Wheel Slip/Slide Protection)	WSP 시스템 고장/오류에 의한 과도한 휠 활주 발생	<ul style="list-style-type: none"> 신호: Slip/Slide 고장발생 및 비상제동* <p>*과도한 활주 발생은 열차의 위치 불확실성을 야기할 수 있으므로 ATP의 보호동작이 필요</p> <p>*활주가 자주 발생할 수 있는 트랙 조건 상에서 운행하는 환경에서는 Doppler Radar 를</p>	카테고리 불특정 (I~III) 해당 고장에 따른 정위치정차 영향 및 신호장치의 비상제동 응답의 정도에 따라서 유연하게 카테고리 I-III를 운용가능

			<p>백업으로 장착하여 휠 활주에 의한 비상제동이 없는 시스템이 고려될 수 있음</p> <ul style="list-style-type: none"> 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	
10.	추진 시스템	<p>TM(Traction Motor) 고장에 의한 추진 제어력 소실 발생</p>	<ul style="list-style-type: none"> 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 신호: ATO 가 원하는 차량의 가속응답이 발생하지 않는 경우 추가 추진명령 발생 후 알람발생 <p>참고: Traction Motor 는 보통 M car 에 4 개가 구성되는데, 고장 개소에 비례하여 추진토크력이 감소하여 신호의 ATO 프로파일 보다 낮은 속도에서 열차가 제어됨</p>	카테고리 III: 종착역까지 운행
11.	제동 시스템	<p>공기 제동 소실 (1 개 대차) - 비상 제동 고장</p>	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 해당고장을 인지하여 저속 제어 (사유: 보장 비상제동율 (GEBR: Guaranteed Emergency Brake Rate) 감소에 따른 비상제동거리 증가) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 III: 종착역까지 운행 종착역까지 운행 후 승객하차. 해당 대차 Isolation 취급 후 수동모드로 차량 기지 회송 (참고: 시스템 사양 혹은 고장의 속성에 따라서 자동 Isolation 구현)
12.		<p>공기 제동 소실 (1 개 대차) - 상용 제동 고장</p>	<ul style="list-style-type: none"> 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 I: 정상운영 참고: 상용제동율에는 영향을 미치지 않음으로 정상운영이 가능
13.		<p>공기 제동 소실 (2 개 대차) - 비상 제동 고장</p>	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 해당고장을 인지하여 저속 제어 (사유: 보장 비상제동율 (GEBR: Guaranteed Emergency Brake Rate) 감소에 따른 비상제동거리 증가) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	카테고리 IV: 다음역까지 운행 다음역까지 운행 후 승객하차. 해당 대차 Isolation 취급 후 수동모드로 차량 기지 회송 (참고: 시스템 사양 혹은 고장의 속성에 따라서 자동 Isolation 구현)
14.		<p>공기 제동 소실 (2 개 대차) - 상용 제동 고장</p>	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 특이사항 없음 (상용 제동율 성능의 저하가 발생하지만 안전측 ATP 가 동작하여 비상제동으로써 	

			<ul style="list-style-type: none"> 열차 보호 가능) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	
15.		<p>낮은 MR (Main Reservoir) 공기압 지속</p>	<ul style="list-style-type: none"> 차량: MR (Main Reservoir) 압력이 특정 bar 밑으로 떨어질 경우 비상제동 체결 신호: 비상제동 체결 (configurable) 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	<p>카테고리 VI: 구원운전 상세한 구원운전 절차는 운영사의 SOP(Standard Operating Procedure)에 따름</p>
16.		<p>의도하지 않은 주차 제동 체결</p>	<ul style="list-style-type: none"> 신호: 추진명령 후 차량이 움직이지 않을 경우 “No Motion” 알람발생 차량: 추진력 발생 후 특정 저속도에 (예: 2km/h) 진입하면 자동으로 주차제동을 완해 차량&신호: 해당 고장 Event 의 OCC 사령 전달 	<p>카테고리 III: 종착역까지 운행 신호의 추진명령에 의하여 주차 제동이 완해되면, 해당 고장차량은 종착역까지 운행 후 기지 회송 (참고: 만일 주차제동이 자동 완해되지 않거나, 운영요원에 의하여 수동으로도 완해가 불가할 경우, 해당 고장차량은 구원조치함)</p>
17.	<p>PWM 발생기* *신호 ATO 의 추진/제동 명령을 PWM 신호로 변환하는 장치로 발주처 사양에 따름)</p>	<p>PWM (Pulse Width Modulation) 발생기 고장에 따른 ATO 추진제어 불가</p>	<ul style="list-style-type: none"> 신호&차량: 추진을 제어할 수 없는 ATO 장치 고장의 경우와 같은 상황으로 Creep 모드*의 원격제어 고려 * 신호장치는 Creep 모드와 운행방향 제어 신호만을 제어하며, 이 신호에 따라서 차량은 제한된 자체 추진력을 제어하는 모드. 보통 다음역까지 열차를 이동시켜 승객을 하차 시킨 후 기지 회송을 위한 특수 모드 차량: TRB (Train Restricted Backup)모드 구현 - 차량의 마스크론 추진조작에 의하여 자체적으로 제한된 추진력을 발생하여 운행할 수 있는 특수 제한운영모드 설계 	<p>카테고리 IV: 다음역까지 운행 참고: Creep 모드 선택 시, 시스템에 의하여 자동으로 다음역까지 이동이 가능함에 반하여, TRB 모드가 선택되면 운영 스텝이 수동으로 개입하여 해당 고장열차를 다음역까지 이동시킴</p>

3. 결 론

본 논문에서는 무인 도시철도 시스템 운영 시나리오의 개념과 이를 정상, 고장, 비상 모드로 구분하고 각 모드의 정의와 하위 카테고리를 설명하였다. 3 가지 모드 중 고장모드에 대하여 차상신호-차량 상호 연관되는 주요한 차량의 고장 시나리오를 살펴보고, 각 시나리오별로 시스템 요구사항 및 권장 운영 절차의 분석을 제공하였다.

무인시스템에서 고장이 발생하면, 차상에 운영 스텝이 없기에 각 상황 별로 빠른 대응을 통해 승객의 안전과 편안한 열차운행을 제공할 수 있어야 하며, 모든 유관 스텝이 유기적으로 협업하여 그 효율성을 확보하여야 한다. 이런 이유로, 설계 단계에서의 상세한 분석을 통해 요구된 사양을 설계에 반영하고, 이를 바탕으로 상세한 운영 절차를 확립하는 것은 매우 중요하다.

이 논문의 내용은 복잡한 무인 도시철도 시스템에서 차량에 국한한 극히 일부 시나리오만을 언급하고 있음으로, 앞으로 동일한 시스템을 구축하고자 하는 발주처/운영사/공급사 모두에게 도움이 되었으면 하며, 상세한 운영 시나리오를 구축하는데 훌륭한 가이드가 되길 바란다.

참고문헌

- [1] IEEE Std 1474-1 (2004), 1474-2 (2003), 1474-3(2008), 1474-4(2011), IEEE Standard for Communications-Based Train Control (CBTC) Performance and Functional Requirements, *IEEE Inc., New York, USA*
- [2] IEC 62290-3 (2019), Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 3: System requirement specification., *IEC, Geneva, Switzerland*