



# 「2024 창의적 종합설계 경진대회」 과제보고서

대 학 명	서울시립대학교		팀 명	국문	오정테크
				영문	OHJeong Tec
작 품 명	국문	터널 내 레일 로봇의 실시간 모니터링 및 협동을 통한 자동차 2차 사고 예방 시스템			
	영문	Rail robot system to prevent car additional accidents in tunnel			
제작기간	2024년 07월 01일 ~ 2024년 09월 01일				
참가분야	다학제융합형(기계, 전기/전자, 문학)				
지식재산권	해당 - 출원번호: 10-2024-0117238				
포상실적	대회명	주최/주관	상격	수상일시	부상내역
	지역사회와 함께하는 서울시립대학교 2024 창의공학설계경진대회	서울시립대학교 / 서울시립대학교 공학교육혁신센터	총장상	2024년 10월 04일	상금 150만원
작품 내용요약	<p>본 작품의 목적은 터널 내 심각한 인명사고를 발생시키는 터널 내 2차 사고(선행 사고나 고장으로 인해 정차한 차량을 뒤따르던 차가 이를 인지하지 못해 발생하는 사고)를 예방하기 위한 새로운 교통 통제 시스템을 마련하는 것이다.</p> <p>본 작품을 통해 터널 상단에 레일 로봇을 300m 간격으로 설치하고, 이 로봇들이 서버와 VMS(Variable Message Sign, 도로 전광 표지)와 함께 이루는 협동적 시스템을, 2차 사고 예방의 Solution으로써 제안하고자 한다. 시스템의 간략한 설명은 아래와 같다.</p> <p>로봇은 순찰 상태에서 AI로 교통사고를 모니터링한다. 로봇 중 하나가 사고를 감지하면, 여러 로봇이 경고등을 점등해 후방 차량에 사고 정보를 알린다. 각 로봇은 중앙 서버와 통신하여 사고 발생지점을 정확히 파악하고, 사고를 예방하기 위한 최적의 위치(사고 지점 1km 전)로 이동하여 경고 신호를 전달한다. 서버는 이와 병렬적으로 터널 입구의 VMS를 통해 사고 사실을 후방 운전자들에게 전달한다. 기본적으로, 로봇은 카메라를 이용해 사고를 인지하고, 로봇과 VMS는 모두 광원을 이용해 경고를 발신한다. 일련의 과정은 전부 공공의 안전이라는 목적 아래 설계된 신호의 흐름이다.</p> <p>이러한 시스템은 터널 내 2차 사고 발생 확률을 대폭 낮출 수 있다. 여러 연구에 따르면, 적절한 위치에서 알림을 제공할 시 2차 사고 예방 효과가 발생하며, 터널 사고 정보를 제공할 시 차량 속도가 20km까지 감소하여 사고 예방 효과가 크다. 본 시스템은 사이렌 등의 직관적인 알림을 통하여 운전자의 주의를 환기한다는 점에서 실효성이 높다. 마지막으로 사고 탐지 시간을 기존 평균 5분에서 2분으로, 차량 흐름 제어 시간을 기존 20분에서 1분으로 줄일 수 있다는 점에서 획기적이다.</p>				
	작품사진				
	<div></div> <div></div>				
	1. 과제의 목적, 개발동기 및 필요성				
<p>터널 내 2차 사고는 일반 교통사고 대비 심각한 치명률을 가지며, 1차 사고 발생 시 신속한 2차 사고 예방 조치가 중요하다. 2차 사고란 선행 사고나 고장으로 인해 정차한 차량을 뒤따르던 차가 이를</p>					

인지하지 못해 발생하는 사고이다. 한국도로공사의 조사에 따르면 2차 사고는 1차 사고보다 6배 높은 치사율을 보인다. 특히, 터널 안이나 다리 위에서 교통사고가 발생하는 경우 연쇄 추돌로 인하여, 일반 도로보다 심각한 인명사고가 발생할 가능성이 높다. 2024년 2월 이주환 국회의원은 “터널 교통사고는 다중 추돌을 불러일으키는 등 막대한 인명 피해를 발생시키는 주범”이라며 “실효성 있는 사고 방지책 마련이 시급하다”라고 언급한 만큼, 터널 내 2차 사고는 더 이상 좌시할 수 없는 사회적 문제이다. 그러나 기존 방안들은 각기 한계점을 갖는다.

기존의 터널 내 사고를 탐지하는 방안에는 ‘모니터링’, ‘운전자의 신고’가 있다. 그런데 한국도로교통공사 동서울 상황실과의 인터뷰에 따르면 터널 내의 여러 장치(CCTV, 소리 감지)를 이용하더라도 사고를 탐지하는 시간은 평균 5분이 걸린다. 모니터링 공백을 최소화하고, 기존보다 신속하게 사고를 감지하여 2차 사고를 예방하는 시스템의 필요성이 드러난다. 같은 인터뷰에 따르면, 사고가 발생한 후 ‘사고 지점에 출동’하여 차량 흐름을 제어하기 위해 차량의 서행과 차선 변경을 유도한다는 정보를 얻을 수 있었다. 다만 고속도로 환경의 특성상, 실제 사고 지점에 도착하기까지의 시간은 사고 감지 후 평균 20분이 소요된다고 한다. 기존보다 빠르게 차량 흐름을 제어해야 한다.

‘터널 진입 차단 시설’은, 터널에 위급상황이 발생했을 시에, 차단막이 내려와 터널 진입을 막는 시설이다. 하지만 이러한 터널 진입 차단 시설에는 2가지 한계가 있다. 첫째로 터널 진입 차단 시설이 작동하여도 운전자가 터널에 진입하는 경우가 있다. 상기된 인터뷰에서 “터널 진입 차단 시설을 봐도 들어가는 운전자가 많다”라는 답변을 들었다. 즉, 터널 진입 차단 시설은 효과적이지 않다. 둘째로 터널 진입 차단 시설은 위치 유동적 알림 제공이 불가능하다. 운전자는 터널 입구에서 알림을 제공받더라도 20-30초 이내로 망각하는 경향이 있으며 사고 지점 1km 전에서 시각적 알림을 제공할 시에 2차 사고 예방 효과가 발생한다고 보았다(신소명 외, 2019). 즉, 고정적 위치에서 알림을 제공하는 것이 아닌, 사고 발생 위치에 따라 위치 유동적으로 알림을 제공하는 시스템이 필요하다.

‘차량 대피 알림 시스템’은 대피 안내를 유선/SMS를 통하여 알림을 제공한다. 주행 중인 운전자에게 유선/SMS로 안내를 제공하는 것은, 그 실효성과 효과성에 의문을 제기하기에 충분하다. 이는 유선, SMS가 아닌 운전자가 직관적(시각적, 청각적)으로 인지할 수 있는 알림 수단의 필요성을 시사한다.

정리하면 기존 시스템은 2차 사고를 예방 효과에 대해 실효성에 관한 의문을 남기며, 한계점을 지닌다. 이에 ‘모니터링 공백 최소화’, ‘신속한 사고 감지’, ‘위치 유동적 알림 제공’, ‘신속한 차량 흐름 제어’, ‘직관적 알림 제공’의 필요성이 대두되는 바이다.

## 2. 과제의 해결방안 및 수행과정

본 과제는 ‘모니터링 공백 최소화’, ‘신속한 사고 감지’, ‘위치 유동적 알림 제공’, ‘신속한 차량 흐름 제어’, ‘직관적 알림 제공’의 목표를 실현하고자 한다. 이를 위하여 레일 로봇을 고안하였다. 레일 로봇은 터널 천장에 레일을 설치하고, 레일을 따라 이동하는 로봇이다.

레일 로봇은 평상시 인공지능을 활용하여 사고를 자동으로 모니터링한다(모니터링 공백 최소화). 더하여 20km/h로 이동하는 레일 로봇을 300m 간격으로 설치한다면, 사고를 2분 이내에 감지할 수 있다(신속한 사고 감지). 사고가 발생하여 레일 로봇이 서버로 사고 정보를 전송하면, 관리자는 관리자 페이지를 통하여 실제 사고 여부를 판단하고 사고 알림을 인가할지, 인가하지 않을지 판단할 수 있다. 사고 알림이 인가된다면, VMS는 시각적으로 사고 정보를 송출한다. 레일 로봇은 사고 정보를 수신하면 알람 제공 위치로 이동한다(위치 유동적 알림 제공). 레일 로봇은 사고 발생 시에 30km/h로 평상시보다 고속으로 이동하며, 이때 알림 장소로 도착하는 시간은 1분 이내이다(신속한 차량 흐름 제어). 최적의 위치로 레일 로봇이 이동하면, 레일 로봇에 탑재된 사이렌, 스피커, 조명 등의 장치를 통하여 후방 운전자에게 시각적/청각적 알림을 제공한다(직관적 알림 제공). 이처럼 레일 로봇을 통하여 ‘모니터링 공백 최소화’, ‘신속한 사고 감지’, ‘위치 유동적 알림 제공’, ‘신속한 차량 흐름 제

어, '직관적 알림 제공'을 매우 효과적으로 실현한다.

#### 평상시

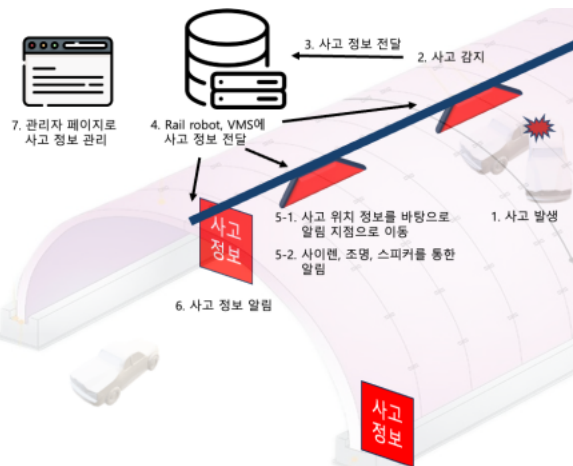
- 레일 로봇: AI를 통한 사고 모니터링
- VMS: 교통 정보 제공

#### 사고 발생 시 - 사고 감지

- 레일 로봇: 사고 감지 후 서버에 사고 정보 전달
- 서버: 레일 로봇, VMS에 사고 정보 전송

#### 사고 발생 시 - 사고 알림

- 레일 로봇: 사이렌, 조명, 스피커를 통한 사고 알림
- VMS: 사고 정보 알림
- 관리자 페이지: 사고 정보 관리



[그림2-2] 사고 발생 시 시나리오

### 3. 과제의 내용

레일 로봇, VMS, 인공지능, 서버는 터널 내의 2차 사고 예방이라는 공통의 목표하에 있다. 레일 로봇, VMS를 통하여 '신속한 사고 감지', '직관적 알림 제공', '위치 유동적 알림 제공', '신속한 차량 흐름 제어'를 실현한다. 더하여 인공지능을 통하여 '모니터링 공백 최소화'의 목표를 달성한다. 마지막으로 레일 로봇, VMS를 실시간으로 제어하고 정보를 관리하기 위하여 서버와 관리자 페이지를 구현한다. 아래는 레일 로봇, VMS, 인공지능, 서버의 기술적 설계이다.

레일 로봇은 터널 내부에 설치된 레일을 왕복 운동한다. 로봇의 Power tree와 모터 제어 회로는 한국 도로 공사에서 발표한 터널 내 풍속, 고속 주행 차량이 지켜야 할 최소 안전거리 등의 정보를 참고하여 교정(Calibration)하였다. 로봇과 레일 간의 마찰 효율을 극대화하기 위한 실리콘 바퀴와 전력 효율성을 위한 Switching regulator가 여기에 해당한다. 로봇의 파손에 대비하여 로봇의 하중, 무게 중심, 레일의 변형, 응력을 상태 변수(State variable)로 두어 안전계수 4 이상의 로봇을 수치해석 기반으로 설계하였으며, Autodesk Inventor CAD 프로그램으로 설계한 모델은 3D 프린터로 출력하였다.

레일 로봇 소프트웨어는 정보를 실시간으로 송수신하고, 수신한 정보를 바탕으로 레일 로봇을 제어하는 역할을 한다. 레일 로봇이 안정적으로 동작할 수 있도록, 통신 보드, 레일 로봇 제어 보드를 분리하였다. 이 두 보드는 UART를 통하여 연결된다. 통신 보드는 Raspberry Pi 5를 활용하였다. Raspberry Pi OS를 통하여 환경을 구축하였다. Polling 방식을 통하여 서버의 정보를 실시간으로 반영하며, auth 정책, API 요구사항을 충실히 수행할 수 있도록 구현하였다. 레일 로봇 제어 보드는 Arduino UNO R3 제품을 선정하였다. 통신 보드로부터 UART를 통하여 명령을 수신받으면, Arduino UNO R3 보드는 STEP 모터를 제어하여 명령을 수행한다.

인공지능은 사고 상황을 판단하는 역할을 갖는다. 가벼운 MobileNetV2 모델을 채택하여 레일 로봇 내의 Raspberry Pi에서 실행되는 온-디바이스 AI로 구현하였으며, 해당 모델을 사고 상황, 일반 상황 등 다수의 이미지를 수집하여 학습시켰다. 정확도는 class 별 평균 97.2%로 측정되었다.

사고 상황을 후방 차량에 알리는 VMS는 기존 시스템의 제어 방식을 재설계하는 방향으로 설계되었다. 과제의 VMS 시스템은 서버로부터 직접 사고 정보를 전달받아 후방 차량에 사고 사실을 알린다. 즉 VMS를 레일 로봇과 함께 서버의 명령을 받는 또 다른 플랜트로 재설계했으며, 이는 향상된 사고 감지 체계와 함께 신속/정확한 사고 정보 전달을 가능하게 한다. 제어 방식만을 바꿨기에, 기존의 VMS 하드웨어를 그대로 사용할 수 있다는 장점이 있으며, 구현은 Arduino UNO R4 보드(Controller)와 BJT로 제어되는 LED Matrix, 그리고 OLED display(Actuator)로 하였다. 더하여, 로봇의 본체엔 사고

사실을 알리는 LED 경고등을 탑재하였으며, 이 경고등은 Power MOSFET을 이용하여 고광도의 빛을 발산한다.

서버는 정보를 효율적으로 관리하고, 기기 간의 통신의 매개체이며, 기기 간 통신을 실시간으로 이룬다. 더하여 관리자 페이지는 관리자가 사고를 인가하거나 정보를 관리하는 역할을 해야 한다. 이러한 서버/관리자 페이지는 MongoDB, Express, React, WebSocket, Web Serial API를 통하여 구현하였고, pm2, Ngnix, Cloudflare을 활용하여 배포하였으며, k6, Lighthouse를 통하여 성능 평가를 진행하였다. 본 과제가 국가 시설(터널)과 관련되어 있으므로 HTTPS/WSS, WAF, DDoS 공격 방어 서비스 등을 활용하여 보안성을 향상하였다. 더하여 API 명세를 작성하여 협업 효율성을 높였다. 이처럼 서버/관리자 페이지는 유지보수성/확장성/보안/성능/협업을 고려하여 설계하였다.

#### 4. 기대효과 및 활용 방안

본 작품은 터널 내 2차 사고 발생 확률을 낮추고, 이로 인한 경제적 손실과 인명 피해를 줄이는 것에 그 목적이 있다. 2차 사고는 후방 운전자들에게 사고 발생 여부를 제공하면 발생 확률이 대폭으로 줄어들며, 이를 실현하기 위해 '레일 로봇을 이용한 통합적 사고 관리 체계'를 기획했다.

본 작품은 기존의 사고 감지 체계와 다르게 첫째, 인공지능을 통하여 감시 공백을 최소화한다는 점, 둘째, 사고 탐지 소요 시간을 기존 5분에서 2분으로 줄인 점, 셋째, 레일 로봇을 통한 위치 유동적 알림을 제공할 수 있다는 점, 넷째, 차량 흐름 제어 소요 시간을 기존 20분에서 1분으로 줄인 점, 다섯째, 레일 로봇, VMS를 통한 직관적인 알림을 제공할 수 있다는 점에서 기대효과를 가진다.

국민의 안전은 금전보다 중요하다. 본 과제는 공공안전의 측면에서 국고 지원을 받아 이루어질 수 있다. 실제로 한국철도연구원은 R&D 운영비를 지원받아 철도 사고에 특화된 레일 로봇을 연구 중이다. 이는 터널 내 사고에 특화된 레일 로봇 또한 국고 지원의 대상이 될 수 있다는 점을 시사한다.

지금까지 레일 로봇 도입을 통한 기대효과 및 실현 가능성에 대해 살펴보았다. 레일 로봇은 터널 내 2차 사고를 기존보다 효과적으로 예방할 수 있다. 더하여 공공안전을 위하여 국고의 지원을 받아 개발이 이루어질 수 있다는 점을, 실제 사례를 바탕으로 살펴보았다. 이에 본 과제는 터널 내 레일 로봇의 실시간 모니터링 및 협동을 통한 자동차 2차 사고 예방 시스템을 제안하는 바이다.

#### 5. 비용분석 및 팀원 간 역할 분담

비용 분석			팀원 간 역할 분담		
항목	세부항목	소요비용(천원)	성명	역할	참여도(%)
재료비	라즈베리파이5, 아두이노 외	470	김도협	팀장, 레일 로봇 소프트웨어 설계	20%
시제품가공비	3d 프린팅 필라멘트	30	오정택	터널, 레일 로봇 하드웨어 설계	20%
기타 경비	서버비용	20	조경호	터널, 레일 로봇 하드웨어 설계	20%
합 계		520	정민석	서버, 관리자 페이지 설계	20%
			정형원	VMS, 레일 로봇 회로 설계	20%
			합 계		100%

#### 6. 참고문헌

김경태, 박민재, 김형규, 이수범, 신소명. (2019). 동영상식 VMS로 사전정보제공시 터널 내 2차사고 감소효과에 관한 연구. 한국안전학회지, 34(2), 56-62.

윤일수, 윤여환, 조용성. (2022). 교통사고 감지 기술 동향과 음향 신호 기반 기술 도입 효과 연구: 터널 및 지하도로를 중심으로. 교통기술과정제, 19(6), 21-27.

박건규, 손영태. (2019-09-26). 고속도로 위험구간(터널부)의 교통사고 특성분석 연구. 대한교통학회 학술대회지, 81. 256-266.

김태복. (2016). 국도, 고속국도 터널 영상유고감지시스템 성능분석 및 대심도 복층터널 특성반영 방안. 한국정보통신학회논문지, 20(7), 1325-1334.